



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

ANÁLISIS ECONÓMICO DEL CORREDOR BARCELONA – VALLÈS

Treball realitzat per:

Paula Ciria Espinosa

Dirigit per:

Àlvar Garola Crespo

Dirigit externament per:

Josep Carles Terés i Casals

Màster en:

Enginyeria de Camins, Canals i Ports

Barcelona, 21/09/2017

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE MÀSTER

RESUMEN

Como residente en el municipio de Sant Cugat del Vallès y usuaria de las tres alternativas para acceder a Barcelona disponibles en el corredor Barcelona – Vallès, carretera de peaje, carretera convencional y línea de ferrocarril; se ha detectado un incremento de demanda durante los últimos años que comporta problemas de congestión en las carreteras y saturación en la línea de ferrocarril.

Fruto de la curiosidad por conocer la verdadera situación del corredor y gracias a trabajar en la empresa Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya, que me ha permitido obtener información real y actualizada sobre la demanda, se realiza un estudio con el objetivo de obtener información de la demanda para poder proponer una solución al problema planteado.

El estudio ha consistido primeramente en caracterizar el problema, donde se ha observado que dada la situación geográfica de Barcelona la demanda se concentra en las únicas vías de acceso disponibles. Posteriormente se investiga sobre la modelización de la demanda, herramienta que permitirá obtener la información deseada. Se establecen las bases de la misma, se expone el modelo de las 4 etapas y se escoge un modelo sencillo centrado en la etapa de elección modal, el Logit Multinomial. Este modelo predice la proporción de demanda que utilizará cada una de las alternativas en función de los Costes Generalizados correspondientes.

Se han recogido los datos necesarios para alimentar el modelo mediante la búsqueda de estándares regionales y el cálculo de algunos de ellos. Estos datos han sido determinados de acuerdo a las hipótesis iniciales de hora punta, equilibrio de Vickrey en cada una de las alternativas, origen municipio de Sant Cugat y destino Sarrià.

Una vez obtenidos los datos se utiliza el modelo y se obtienen los primeros resultados que permiten ampliar en análisis. Los Costes Generalizados de la alternativa ferrocarril actualmente son un 25% inferiores a los de las carreteras, en condiciones no congestionadas los de las carreteras serían un 30% inferiores a los del ferrocarril.

En posteriores análisis se deduce que la demanda de este corredor tiene un valor del tiempo más elevado que la media de la región, el poder adquisitivo elevado de la zona influye en la elección del vehículo privado frente al transporte público, los destinos alejados de Sarrià perjudican notablemente la alternativa ferrocarril, los efectos de la congestión no son penalizados tan negativamente como sería de esperar y el factor comodidad que proporciona el vehículo privado frente al transporte público es una variable altamente importante para la demanda de este corredor.

Por último se analiza la capacidad del ferrocarril para proponer soluciones al problema planteado inicialmente y para que sea capaz de absorber la mayor cantidad de demanda posible, beneficiando así a todos los usuarios del corredor tanto económica, como social y ambientalmente. Además, ciertas situaciones como las nuevas prolongaciones de la línea, el incremento de la movilidad general y las próximas penalizaciones y restricciones al vehículo privado harán incrementar la demanda del ferrocarril. Las posibles actuaciones son la mejora de los sistemas de señalización ferroviarios que permiten incrementar la frecuencia, la reordenación de los servicios que actualmente está desarrollándose, o la ejecución de la nueva infraestructura del túnel de Horta.

RESUM

Com a resident en el municipi de Sant Cugat del Vallès i usuària de les tres alternatives per accedir a Barcelona disponibles en el corredor Barcelona – Vallès, carretera de peatge, carretera convencional i línia de ferrocarril; s'ha detectat un increment de la demanda durant els últims anys que comporta problemes de congestió a les carreteres i saturació a la línia de ferrocarril.

Fruit de la curiositat per conèixer la veritable situació del corredor i gràcies a treballar a l'empresa Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya, que m'ha permès obtenir informació real i actualitzada sobre la demanda, es realitza un estudi amb l'objectiu d'obtenir informació de la demanda per poder proposar una solució al problema plantejat.

L'estudi ha consistit primerament en caracteritzar el problema, on s'ha observat que donada la situació geogràfica de Barcelona la demanda es concentra en les úniques vies d'accés disponibles. Posteriorment s'investiga sobre la modelització de la demanda, eina que permetrà obtenir la informació cercada. S'estableixen les bases de la mateixa, s'exposa el model de les 4 etapes i s'escull un model senzill centrat en l'etapa d'elecció modal, el Logit Multinomial. Aquest model prediu la proporció de demanda que utilitzarà cadascuna de les alternatives en funció dels Costos Generalitzats corresponents.

S'han escollit les dades necessàries per alimentar el model mitjançant la recerca d'estàndards regionals i el càlcul d'alguns d'ells. Aquestes dades han sigut determinades d'acord a les hipòtesis inicials de l'hora punta, equilibri de Vivkrey en cadascuna de les alternatives, amb origen al municipi de Sant Cugat i amb destí Sarrià.

Un cop obtingudes les dades es fa servir el model i s'obtenen els primers resultats que permeten ampliar l'anàlisi. Els Costos Generalitzats de l'alternativa ferrocarril actualment són un 25% inferiors als de les carreteres, en condicions congestionades, els de les carreteres serien un 30% inferiors als del ferrocarril.

En posteriors anàlisis es dedueix que la demanda d'aquest corredor té un valor del temps més elevat que la mitjana de la regió, el poder adquisitiu elevat de la zona influeix en l'elecció del vehicle privat en front al transport públic, els destins allunyats de Sarrià perjudiquen notablement l'alternativa del ferrocarril, els efectes de la congestió no són penalitzats tant negativament com seria d'esperar i el factor de comoditat que proporciona el vehicle privat en front al transport públic és una variable altament importat per la demanda d'aquest corredor.

Per últim s'analitza la capacitat del ferrocarril per proposar solucions al problema plantejat inicialment perquè sigui capaç d'absorbir la major quantitat de demanda possible, beneficiant així a tots els usuaris del corredor tant econòmicament, com social y ambientalment. A més, certes situacions com les noves prolongacions de la línia, l'increment de la mobilitat general i les properes penalitzacions i restriccions del vehicle privat faran incrementar la demanda del ferrocarril. Les possibles actuacions són la millora dels sistemes de senyalització ferroviària que permeten incrementar la freqüència, la reordenació dels serveis que actualment s'està desenvolupant, o l'execució de la nova infraestructura del túnel d'Horta.

ABSTRACT

As a resident of Sant Cugat del Vallès municipal district and user of the three alternatives to access to Barcelona, toll road, conventional road and rail line, which are part of the Barcelona – Vallès corridor, a demand increment has been detected. This increment entails problems of congestion in the roads and overcrowding in the rail line.

This study is done as a result of curiosity in knowing the real situation of the corridor and thanks to be working in the company Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya, which has allowed me the opportunity of having real and updated demand information. The main objective is to obtain information of the demand to be able to propose a solution to the problem posed.

The study firstly characterizes the problem, when has been observed that the demand is concentrated in the few available access paths to the city due to its geographical situation. Afterwards, shows some research about demand modelling, tool that will allow obtaining the desired information. The study explains the basis of the tool, the four step classical model and the used model, which is the Logit Multinomial. This is a simple model centered in the modal choice step and which predicts the proportion of demand that will choose each of the alternatives depending on their Generalized Costs.

The needed data for using the model was collected from regional standards and from calculations. These data has been established according to the initial hypothesis of rush hour, Vickrey's equilibrium in each of the alternatives, origin Sant Cugat and destiny Sarrià.

Once the data are obtained the model is used and the first results are obtained which lead to a wider analysis. The Generalized Costs of rail alternative are currently 25% lower than the roads Generalized Costs, in non-congested conditions the roads costs will be 35% lower than those of the rail.

In subsequent analysis is deducted that the demand of this corridor has higher Value of Time than the average of the region. The purchasing power of the municipality influences the choose of the private vehicle front public transport. Far destinies from Sarrià considerably damage the rail alternative. The effects of congestion are not as penalized as expected and the comfort factor that the private vehicle offers front the public transport is a very important variable for the corridor demand.

Finally, the capacity of the rail is analyzed to propose solutions to the posed problem at the beginning, and to ensure that the rail is capable to transport the maximum possible demand, which will benefit all the users of the corridor in economic, social and environmental terms. Moreover, some situations like the new prolongations of the line, the global increment of the movility and the future restrictions and penalizations to the private vehicle will increase the rail demand. The possible actions are improvements in the rail signaling systems, rearrangements of the current services which allow to increment the trains frequency, or the execution of the new infrastructure, Horta túnel.

ÍNDICE

Resumen	3
Resum	5
Abstract	7
Índice	9
1. Introducción y objetivos	11
2. Planteamiento del problema	15
2.1. <i>Situación geográfica</i>	15
2.2. <i>Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya</i>	18
2.3. <i>Túneles de Vallvidrera</i>	20
2.4. <i>Carretera de Vallvidrera</i>	21
2.5. <i>Problemática</i>	22
3. Modelización del transporte	23
3.1. <i>Planificación</i>	23
3.2. <i>Estructura clásica del modelo de transporte</i>	25
3.3. <i>Consideraciones previas</i>	26
3.4. <i>Teoría vs práctica</i>	29
3.4.1. Razones para escoger modelos teóricos más complejos	29
3.4.2. Razones para no escoger modelos teóricos complejos	29
4. Construcción del modelo analítico	31
4.1. <i>Modelos agregados o desagregados</i>	31
4.2. <i>Etapas de elección modal</i>	32
4.2.1. Factores que influyen en la elección modal	33
4.3. <i>Elección del modelo</i>	34
4.3.1. Modelo Logit Multinomial	34
5. Recopilación de datos	37
5.1. <i>Consideraciones iniciales</i>	37
5.1.1. Hora punta y motivos ocupacionales	37
5.1.2. Origen y destino	38

5.1.3. Equilibrio de Vickrey	40
5.2. Valor del tiempo (<i>VdT</i>)	42
5.3. Tiempos	44
5.3.1. Carretera de peaje	44
5.3.2. Carretera convencional	46
5.3.3. Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya	46
5.4. Costes de operación del vehículo privado	48
5.5. Tasas	49
5.6. Resumen	50
6. Prueba y calibración del modelo	53
6.1. Resultados del modelo teórico	53
6.2. Resultados del modelo teórico sin congestión	55
6.3. Datos reales	57
6.3.1. Demanda de las carreteras	58
6.3.2. Demanda del ferrocarril	60
6.3.3. Demandas finales	62
6.4. Influencia de las variables	63
6.4.1. Características de la población	63
6.4.2. Variables	65
6.5. Propuesta de calibración	70
6.6. Capacidad del sistema	72
6.6.1. Capacidad de las carreteras	72
6.6.2. Capacidad del Ferrocarril	72
7. Soluciones	75
7.1. Incremento de la demanda	75
7.1.1. Nuevas estaciones	75
7.1.2. Aumento general de la movilidad	77
7.1.3. Prohibiciones vehículo privado	80
7.2. Soluciones posibles	81
7.2.1. Señalización	81
7.2.2. Reordenación líneas	83
7.2.3. Nueva infraestructura	83
7.3. Otras soluciones	85
8. Conclusiones	87
9. Referencias bibliográficas	91
9.1. Libros, artículos y proyectos	91
9.2. Webs	92

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Las principales vías de acceso a Barcelona desde Sant Cugat del Vallès son mediante los accesos norte y sur de la ciudad o en línea recta atravesando la sierra de Collserola, a ésta última la denominamos corredor Barcelona - Vallès. Existen tres alternativas para acceder a Barcelona mediante dicho corredor: la carretera de peaje Túneles de Vallvidrera, la carretera convencional de Vallvidrera y la línea de Ferrocarril de Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya.

Como residente en el municipio de Sant Cugat, y usuaria de todas las alternativas mencionadas, se ha observado un incremento de la demanda durante los últimos años que comporta **problemas de congestión en las carreteras y saturación en la línea de ferrocarril**, situación de la que también se hacen eco los medios de comunicación:

“Els usuaris de la línia del Vallès de Ferrocarrils de la Generalitat fa mesos que mostren el seu descontentament per les aglomeracions que es produeixen en els combois en les hores puntes, sobretot des de la posada en marxa de noves estacions a Terrassa i Sabadell.”

Bella, B. (2017, Marzo) El president de FGC diu que els tren no superen el 90% de l'ocupació en hora punta. Tot Sant Cugat. Recuperado de: <http://www.totsantcugat.cat/actualitat/ciutat/mobilitat/el-president-de-fgc-diu-que-els-trens-no-superen-el-90-de-l-ocupacio-66301102.html>

“Els accessos per carretera a la ciutat de Barcelona són cada vegada més complicats per les retencions diàries. Un exemple ben conegut pels santcugatencs són els Túneles de Vallvidrera, que cada matí registren retencions quilomètriques en direcció a la capital catalana. Unes cues que enguany han augmentat de manera important i recorden als temps anteriors a l'inici de la crisi.”

Redacció del TOT. (2017, Enero) Les retencions als accessos a Barcelona augmenten un 26% en un any. Tot Sant Cugat. Recuperado de: <http://www.totsantcugat.cat/actualitat/ciutat/mobilitat/les-retencions-als-accessos-a-barcelona-augmenten-un-26-en-un-any-65136102.html>

“Los Ferrocarriles de la Generalitat de Cataluña (FGC) ha batido su récord histórico de viajeros con 81,4 millones de usuarios en 2016, 1,8 millones más que en 2015.”

EFE. (2017, 9 de Febrero) Ferrocarriles bate su récord histórico con 81 millones de viajeros en 2016. La Vanguardia. Recuperado de: <http://www.lavanguardia.com/vida/20170209/414190670300/ferrocarriles-bate-su-record-historico-con-81-millones-de-viajeros-en-2016.html>

“El gobierno catalán ha aprobado hoy destinar 130 millones de euros a la compra de 15 nuevos trenes que funcionarán en la línea del Vallès de Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya (FGC), lo que permitirá incrementar las frecuencias de paso.

La compra de este material para el llamado metro del Vallès tiene como objetivo dar respuesta al aumento de la demanda que está experimentando esta línea tras la prolongación hasta Terrassa y la previsión de abrir dos nuevas paradas en Sabadell”

EFE. (2017, 9 de Mayo) Govern destina 130 millones a la compra de 15 trenes para la línea del Vallès. La Vanguardia. Recuperado de: <http://www.lavanguardia.com/politica/20170509/422416832897/govern-destina-130-millones-a-la-compra-de-15-trenes-para-la-linea-del-valles.html>

Fruto de la curiosidad por conocer la verdadera situación del corredor, y ante la necesidad de realizar el Trabajo de Final de Máster poniendo en práctica las habilidades adquiridas durante el Máster en la especialidad de Ingeniería del Transporte, surgió la idea de realizar un análisis de la demanda del corredor Barcelona – Vallès.

El factor determinante para la elección de este trabajo fue estar trabajando en la empresa Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya, gracias a ello he podido obtener datos reales y actualizados de la situación, y además, me ha permitido contactar con la empresa concesionaria de los Túneles de Vallvidrera para así obtener el resto de datos.

El objetivo principal que se pretende conseguir con este trabajo es **conocer el comportamiento de la demanda para poder proponer una solución al problema planteado**, así como poner de manifiesto los problemas actuales y futuros del corredor.

Para la consecución del objetivo principal se han establecido objetivos secundarios que a medida que van siendo conseguidos permiten obtener los conocimientos para llegar al fin deseado.

En primer lugar se necesita **caracterizar el problema**, para ello se ha detallado la situación comenzando desde la perspectiva más global y acabando en la más concreta. Es decir, el problema se encajará en el marco territorial de la ciudad para así conocer las condiciones de contorno, posteriormente se detallan cada una de las alternativas. Este primer objetivo se expone en el capítulo 2 del presente documento.

En el capítulo 3 se da respuesta a la necesidad de **establecer las bases de la modelización**, ya que que la herramienta que da información sobre la demanda es la modelización del transporte. Para ello se define el proceso de planificación en el que está incluida la modelización del transporte para conocer cuál es el fin y el uso de la misma, posteriormente se detalla el modelo de las cuatro etapas que corresponde a la estructura clásica de la modelización, y además se detallan las consideraciones a tener en cuenta durante el proceso de modelización y en la elección del modelo.

Una vez conocidas las bases de la modelización se procede a la **elección del modelo analítico** más adecuado a nuestra problemática, proceso detallado en el capítulo 4. Después de detallar la etapa de elección modal en la que se centrará el presente análisis y definir el tipo de modelo en el que estamos interesados, se muestran las características del mismo adaptadas a nuestro problema.

Una vez determinado el modelo se procede a la **recopilación de datos** que lo alimentarán, este proceso se detalla en el capítulo 5. En primer lugar deben realizarse diversas consideraciones en relación a las características del problema analizado que condicionan los datos y posteriormente se detalla la metodología escogida para la recopilación de los datos.

En el capítulo 6 de este documento se lleva a cabo una de las partes más importantes en relación al objetivo principal, el **análisis de los resultados**. A lo largo de diversos apartados se expondrán los

resultados obtenidos en la modelización realizada, se compararán con la realidad, se propondrán mejoras, y se detectarán las debilidades del corredor.

Fruto de los resultados obtenidos mediante la consecución de los objetivos anteriores se procede en el apartado 7 a la búsqueda y cuantificación de **soluciones factibles** para la problemática expuesta en el presente trabajo. Para ello se detallan los agravantes de la situación actual, las medidas puestas en marcha para solucionarla y las futuras líneas de investigación. Finalmente se concluye el trabajo con las **conclusiones** extraídas de todo el proceso y la respuesta al principal objetivo del presente trabajo.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Entre Barcelona y el Vallès Occidental se producen a diario miles de desplazamientos con motivos diversos. Estos desplazamientos se producen mediante varias rutas disponibles, entre las que se encuentran tres alternativas que atraviesan en línea recta la sierra de Collserola: el ferrocarril, la carretera de peaje y la carretera convencional.

Durante los últimos años se ha observado un importante crecimiento de la demanda en cada una de las tres alternativas mencionadas, y es precisamente de esta observación de donde surge la idea de estudiar y analizar el comportamiento de la demanda en el corredor Barcelona – Vallès. En este apartado se presentan las condiciones de contorno y la situación actual de la problemática a analizar.

2.1. Situación geográfica

Para entender la situación del corredor Barcelona – Vallès se describirán las características del marco territorial catalán y de la situación de Barcelona ya que históricamente han condicionado la configuración de las infraestructuras existentes.

La geomorfología principal de Cataluña se compone de límites orográficos y brechas fluviales tal y como se aprecia en la Figura 1 y se explica a continuación.

Límites orográficos: Compuestos por tres cadenas montañosas principales que confluyen en la “anilla del Empordà”.

- Cordillera Litoral: paralela a la costa y prácticamente adosada a ella en las costas de Girona, dando lugar a la Costa Brava; en tramos más al sur, costas del Maresme y del Barcelonés, forma la Depresión Litoral y acaba en el mar en Garraf. Sus cimas, que no son muy pronunciadas, superan los 500 metros llegando hasta máximos de 700 metros.
- Cordillera Prelitoral: también de trazado paralelo al mar, y por tanto a la Cordillera Litoral, abarca todo el territorio catalán. Entre las dos cadenas montañosas se conforma la Depresión Litoral que junto con la Depresión Prelitoral será el gran corredor de paso entre la península y Europa. Las altitudes superan los 1.000 metros y el Monstseny alcanza los 1.700 metros siendo éste el macizo predominante.
- Pirineos: son la mayor cordillera en cuanto a magnitud, ocupa un tercio de la extensión de Cataluña; y altitud, sus cimas superan los 3.000 metros. Entre los Pirineos y la Cordillera Prelitoral se forma la Depresión Central, que es una depresión teórica en sentido geológico pero en realidad es una tierra de montaña mediana con altiplanos.

Brechas fluviales: Las estructuras orográficas orientadas de suroeste a noreste, están surcadas por una estructura hidrográfica que las cortan perpendicularmente en sentido Norte – Sur que permiten

la comunicación mediante la instalación de infraestructuras que no deben salvar obstáculos geográficos.

- Tordera: Conexión entre la Depresión Litoral y la Prelitoral.
- Ter - Plana de Vic – Congost – Besòs: Conexión entre Pirineos, Plana de Vic y las dos cordilleras y las dos depresiones, por la parte norte de Barcelona.
- Cardener – Llobregat: Conexión entre Pirineos, Depresión central y las dos cordilleras y las dos depresiones, por la parte sur de Barcelona.
- Francolí: Conexión entre la Depresión Central y la depresión Litoral.

Dada esta configuración geográfica se observa que Barcelona estaba predestinada a ser la capital debido a su estratégica posición: conexión vía marítima, confluencia de las dos principales brechas hidrográficas que implica comunicación directa con todo el territorio catalán y todas sus conexiones, y además es el lugar más amplio en extensión de la Depresión Litoral lo que permite a la ciudad formar parte del corredor litoral y disponer de suficiente extensión.



Figura 1. Geomorfología de Catalunya. Fuente: Generalitat de Catalunya.

Entendida la situación geográfica se hacen evidentes las diferentes alternativas de conexión entre Barcelona y el Vallès Occidental situado en el corredor Prelitoral: mediante las dos brechas abiertas por los ríos Besòs y Llobregat y una tercera conexión directa a través de la sierra de Collserola.

Para viajar desde el Vallès Occidental hasta Barcelona mediante la conexión directa que atraviesa la sierra de Collserola se dispone de tres alternativas que en los siguientes apartados se caracterizarán: carretera de peaje Túneles de Vallvidrera, carretera convencional de Vallvidrera, y línea de ferrocarril de Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya. La carretera de Vallvidrera, se representa en azul, sin embargo, este desplazamiento comparte un primer tramo mediante los Túneles de Vallvidrera tal y como puede observarse en la Figura 2.



Figura 2. Rutas alternativas en la conexión directa. Fuente: Elaboración propia, adaptado Google Maps.

Existen otras dos rutas alternativas para viajar a Barcelona desde Sant Cugat del vallès, son las que recorren las brechas naturales del Llobregat y del Besòs y corresponden a la B-23 y a la C-58 respectivamente. Estas rutas quedan fuera del alcance del estudio que se realiza en el presente trabajo ya que las demandas que discurren por las mismas tienen orígenes y destinos muy dispersos, que como se comentará en apartados posteriores, no tienen porqué coincidir con el origen y destino aquí analizado.

En caso de querer ampliar el presente estudio debería buscarse la proporción de demandas que discurren por estas dos vías de acceso que podrían ser absorbidas por el ferrocarril.

2.2. Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya

Los orígenes de los Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya (FGC) coinciden en el tiempo con los orígenes del ferrocarril en el país. La primera solicitud de concesión del ferrocarril de Barcelona a Sarrià se pidió en el año 1851, tres años después de la inauguración de la primera línea de ferrocarril de la España actual, Barcelona - Mataró.

El tren de Sarrià inicia su historia en el 1863, momento en que empezó a circular el primer tren de la Compañía del Ferrocarril de Barcelona a Sarrià, al mismo tiempo que el Metro de Londres. Se trataba de una pequeña línea de 4,6km de longitud, construida en ancho de vía ibérico de 1672mm, que salía de donde hoy se encuentra la plaza de Catalunya, entonces a las afueras de la ciudad, y cruzaba la llanura de Barcelona pasando por los pueblos de Gràcia, Sant Gervasi y llegaba a Sarrià, a los pies de la montaña de Collserola. El nuevo ferrocarril daba respuesta así al deseo de comunicación de los pueblos de alrededor de la ciudad de Barcelona y fue un factor principal en la urbanización de los alrededores, cuando la ciudad empezó a extenderse por la llanura guiada por el proyecto pionero de planificación urbana del ingeniero Ildefons Cerdà. Así, este tren puede ser considerado como uno de los primeros ferrocarriles urbanos de Europa.

A pesar del éxito de la línea la compañía explotadora se había endeudado tanto que quebró en 1974 y fue absorbida por la nueva sociedad del Ferrocarril de Sarrià a Barcelona. Durante varias décadas, los trenes de Sarrià fueron remolcados por locomotoras a vapor y estaban formados por pequeños coches de madera. Pero en el siglo XX, con el desarrollo gradual del Eixample, el viejo tren pasó a ser anacrónico. En 1905 la compañía decidió proceder a una reforma en profundidad: el itinerario se cambió a ancho internacional de 1.435mm y, a la vez, la tracción vapor se sustituyó por la electrificación. De esta manera, el tren de Sarrià se convirtió en el primer ferrocarril eléctrico en Catalunya. El crecimiento progresivo de Barcelona condujo a la absorción de los pueblos circundantes y posibilitó en 1907 la extensión del ferrocarril de Sarrià con una nueva línea a partir de Tres Torres, que subía directamente a los pies de la montaña de Collserola donde conectaba con el funicular de Vallvidrera que se había inaugurado en 1906 a cargo de la misma empresa.

La conversión del tren de Sarrià en la red suburbana tal como se conoce hoy en día se inició en 1912, cuando el ingeniero Carles Emili Montañés demostró la necesidad y la viabilidad de un medio de comunicación entre Barcelona y el Vallès. Asociado con Frederick Stark Pearson, en 1912 fundaron la "Compañía de los Ferrocarriles de Catalunya", con la que se inició la excavación del túnel bajo la montaña de Collserola permitiendo la ampliación de la red urbana hacia las ciudades de Terrassa y Sabadell. En 1917 se inauguró el tramo de doble vía hasta Sant Cugat del Vallès. En 1919 la línea llegó a Terrassa y en 1922 a Sabadell.

En 1929 se cubrieron las vías desde Barcelona-Pl. Catalunya hasta Muntaner y entre los años 50 y 70 continuó extendiéndose el túnel al resto de la línea de Barcelona. En los años 50, también se inauguró el ramal entre Gràcia y Av. Tibidabo. Una situación económica precaria llevó a la empresa al abandono del servicio en 1977, un año después de que se inaugurara el ramal de Sarrià a Reina Elisenda. Desde entonces y hasta el traspaso a la Generalitat de Catalunya en 1978, la compañía estatal Ferrocarriles de Vía Estrecha (FEVE) se hizo cargo de la línea.

A continuación se muestran las características de la línea mediante la Tabla 1. Se complementa la información con el esquema de la línea de la Figura 3. Los datos que se utilizarán en este trabajo no incluirán las estaciones La Creu Alta, Sabadell Nord y Sabadell Parc del Nord del ramal correspondiente a Sabadell ya que han sido inauguradas este pasado Julio de 2017.

Longitud de Sarrià a Sant Cugat	10,70 km
Frecuencia en hora punta	3 min
Ancho	UIC
Vía	doble
Carril	54 Kg/m
Máxima velocidad	90 km/h
Rampa máxima	44 ‰
Radio mínimo	110 m
Recorrido en túnel	42,2 ‰
Recorrido en puente	1,9 ‰

Tabla 1. Características de la línea FGC. Fuente: Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya.



Figura 3. Esquema de la línea del Vallès. Fuente: Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya.



Figura 4. Línea FGC Barcelona – Vallès. Fuente: Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya.

2.3. Túneles de Vallvidrera

A mediados del siglo XX debido al peso socioeconómico de la ciudad de Barcelona y de la comarca del Vallès Occidental, se hace necesaria la construcción de un eje viario que potencie y garantice las comunicaciones entre las dos zonas, facilitando así el crecimiento y desarrollo económico de ambas. Como consecuencia de esta necesidad, en Febrero de 1967 el Ayuntamiento de Barcelona inicia los trámites para la adjudicación por concurso de las obras de construcción de uno o más túneles urbanos a través de la sierra de Collserola.

En julio de 1967 se constituye la empresa "Túneles y Autopistas de Barcelona, S.A." (TABASA) como empresa licitadora para el concurso de las obras de los túneles de Vallvidrera. En diciembre del mismo año, se constituye el "Consortio Túneles del Tibidabo" que agrupa los municipios implicados en la obra y que dos años más tarde, en diciembre de 1969, adjudica a TABASA la construcción y explotación de los túneles de Vallvidrera.

El proyecto inicial contemplaba la posibilidad de realizar hasta tres túneles, el occidental o de Vallvidrera, el central o del Tibidabo y el oriental o de Horta. La necesidad de construir costosos accesos forzó a que el contrato se limitase a la construcción del túnel de Vallvidrera y el túnel de la Rovira, que era una obra en el interior de la ciudad, imprescindible para el diseño del acceso sur al futuro túnel de Horta.

Las obras avanzaron lentamente entre el secretismo de las instituciones y las protestas vecinales, contrarias a los grandes proyectos urbanísticos que modificaban radicalmente algunos barrios de Barcelona. Finalmente en 1974 trascendieron las dificultades para continuar las obras y se paralizaron los trabajos sin fecha de reanudación.

En 1980, como consecuencia del traspaso de competencias de la red de carreteras del Ministerio de Obras Públicas a la Generalitat de Catalunya, se modifica la titularidad de la construcción de los Túneles de Vallvidrera con explotación prevista en régimen de peaje directo, y finalmente en 1986 se aprobó el nuevo anteproyecto. En 1988 comenzó la perforación del nuevo túnel y el antiguo se acondicionó como galería de emergencia para evacuar a los usuarios en caso de accidente. En 1991 se inauguró la autopista de los Túneles de Vallvidrera.

A día de hoy los túneles de Vallvidrera forman parte de la Autopista E-09/C16 y tienen las siguientes características:

Longitud de Sant Cugat a Sarrià	10 Km
Túneles	47% del trazado
Vía de peaje	Sí
Sección	2+1 con carril central reversible en el túnel principal
	2+2 en el resto de la concesión
Máxima velocidad	110 km/h

Tabla 2. Características de la carretera de peaje Túneles de Vallvidrera. Fuente: Túnels de Barcelona i Cadí, Concessionària de la Generalitat de Catalunya, SA.



Figura 5. Túneles de vallvidrera. Fuente: *Túnel de Barcelona i Cadí, Concessionària de la Generalitat de Catalunya, SA.*

2.4. Carretera de Vallvidrera

Es una carretera convencional de calzada única con un carril en cada sentido. Esta vía de conexión entre Barcelona y el Vallès Occidental tiene su origen en antiguos caminos que conectaban tanto estos dos núcleos de población como el pueblo de Vallvidrera y Les Planes bordeando la sierra de Collserola, esto da lugar al trazado sinuoso y complicado característico de un puerto de montaña. A lo largo de los años 70, 80 y 90 fue siendo progresivamente asfaltada.

Longitud de Sant Cugat a Sarrià	13,6 km
Sección	1+1
Desnivel	70 m
Máxima Velocidad	50 km/h

Tabla 3. Características de la carretera de peaje de Vallvidrera. Fuente: *Google Maps.*



Figura 6. Carretera de Vallvidrera. Fuente: *Google Maps.*

2.5. Problemática

Por experiencia, y como se ha justificado en la introducción mediante los recortes de prensa, se constata que las tres rutas de acceso a la ciudad de Barcelona en hora punta están saturadas. Una muestra de ello es la congestión que se genera en las dos carreteras que se puede observar en la Figura 7, ésta representa el tráfico normal de un día típico entre semana a las 8:00 de la mañana. Y el problema no queda únicamente en las carreteras ya que los trenes en hora punta circulan prácticamente al límite de capacidad.

La problemática expuesta se agrava si además se tiene en cuenta la puesta en marcha de nuevas estaciones en Terrassa y Sabadell que harán y están haciendo incrementar la demanda del ferrocarril. También se debe añadir el incremento de la movilidad debido al final de la crisis, en estos momentos los valores de congestión de la ciudad de Barcelona son similares a los anteriores a la crisis y las previsiones incluyen no sólo la recuperación de los niveles anteriores a la crisis sino un incremento continuado.

Por último, se deben tener en cuenta también las nuevas políticas que podrían comenzar a instaurarse en Barcelona como la restricción de la entrada a la ciudad de vehículos privados, o la prohibición de los mismos debido a razones de elevadas concentraciones de polución.

Por estos motivos, en este trabajo se pretende estudiar la problemática presentada mediante la modelización del transporte.

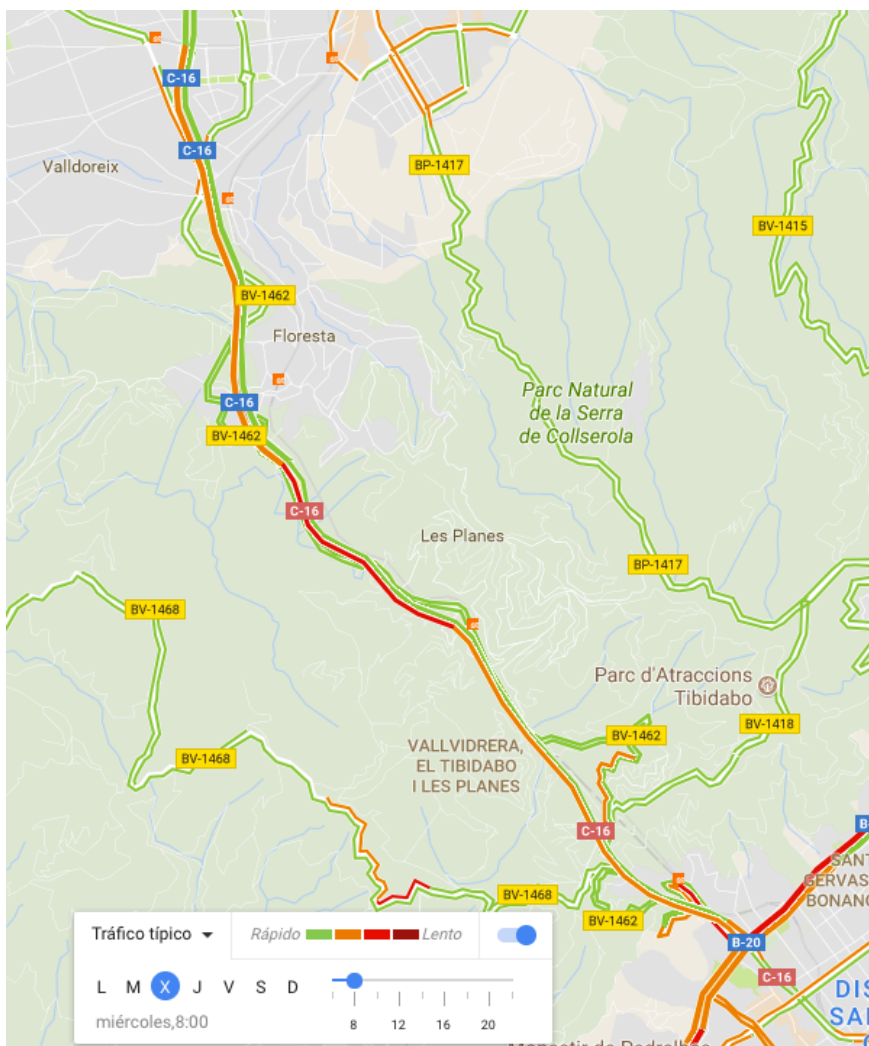


Figura 7. Tráfico típico de un miércoles a las 8:00 am. Fuente: Google maps.

3. MODELIZACIÓN DEL TRANSPORTE

Tener una red de transporte eficiente requiere planificación e inversión, los recursos económicos son limitados pero además, las redes de transporte sufren otras muchas restricciones como pueden ser físicas, sociales o medioambientales. Por lo tanto el papel de la modelización del transporte consiste en ser una herramienta de ayuda a la toma de decisiones incluida en el proceso de planificación que permita optimizar la inversión de los recursos teniendo en cuenta las condiciones de contorno.

En este apartado se presenta la teoría de la modelización del transporte de la cual se partirá para analizar la problemática presentada en el apartado anterior. La información teórica de este apartado se ha extraído principalmente del libro *Modelling Transport* (Ortúzar y Willumsen, 2011).

3.1. *Planificación*

La modelización del transporte por sí misma no resuelve los problemas planteados en las redes de transporte, para que resulte realmente útil, debe ser incluida en un proceso de decisión. A continuación se presenta el modelo de decisión racional clásico en el que los modelos matemáticos de modelización son una etapa clave tal y como se observa en la Figura 8.

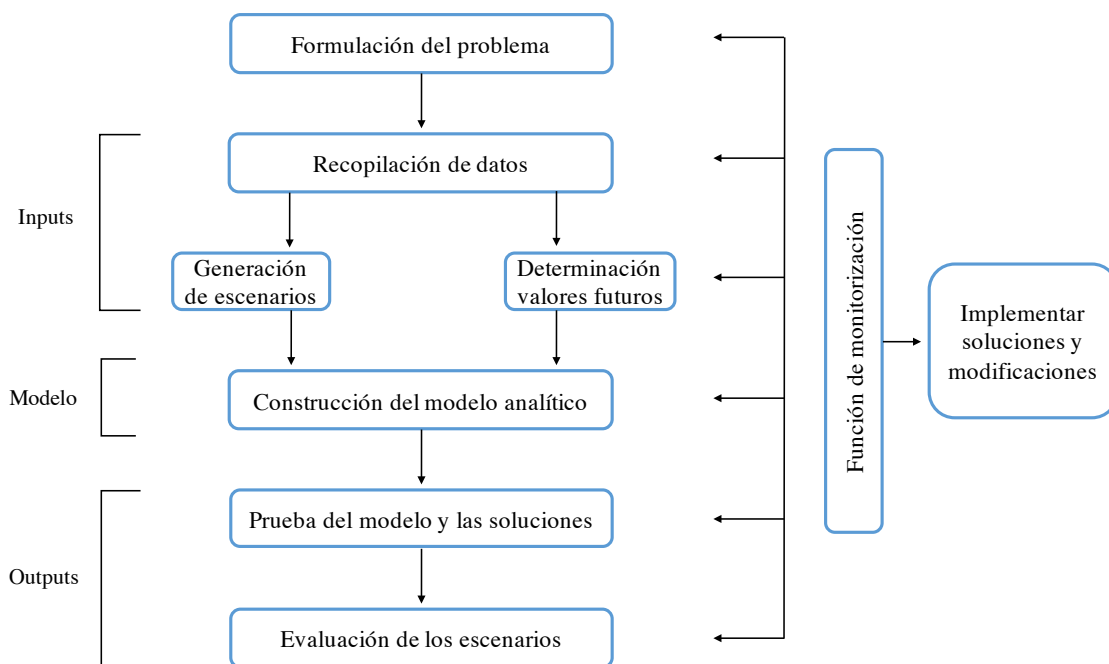


Figura 8. Estructura de planificación. Fuente: Elaboración propia.

- Formulación del problema:

La formulación del problema es la motivación del proceso de planificación. Un problema puede definirse como un desequilibrio entre las expectativas y la realidad percibida, la formulación del mismo se compone de tres tipos de información: objetivos, que reflejan los valores deseables a alcanzar mediante el proceso de decisión; estándares, que indican los niveles de servicio que se proporcionan; y restricciones, que pueden ser de múltiples naturalezas como económica, financiera, temporal, geográfica o técnica entre otras.

- Recopilación de datos:

Una vez formulado el problema con la información básica se procede a la recopilación de datos técnicos que posteriormente alimentarán el modelo analítico. Por este motivo los datos necesarios están estrechamente relacionados con el desarrollo del modelo ya que éste último es el encargado de definir la tipología de datos necesaria.

- Generación de escenarios:

El modelo analítico construido en el paso posterior nos permitirá analizar diferentes situaciones futuras deseadas que pueden determinarse mediante diferentes medios, como por ejemplo, la experiencia de los planificadores, las peticiones de las partes interesadas o usando técnicas de optimización.

- Determinación de valores futuros:

Para poder evaluar las soluciones o esquemas propuestos en los diversos escenarios se deben conocer los nuevos datos que proporcionarán las diferentes situaciones y que se introducirán en el modelo como datos de partida. Este paso requiere la descripción detallada sobre el futuro del área de estudio para lo que normalmente se utilizan previsiones de otros sectores y unidades de planificación.

- Construcción del modelo analítico:

El modelo analítico será el motor del proceso de planificación y se trata de uno o varios modelos matemáticos, que mediante fórmulas hacen una representación simplificada de una parte del mundo real, focalizándose en ciertos elementos considerados importantes desde el punto de vista del cual se estudia el problema. En general, se tiende a escoger la modelización más simple que haga posible la elección más adecuada entre varios esquemas. El desarrollo del modelo se compone de la definición del mismo, estimación de datos, calibración de parámetros y validación mediante datos no usados en la calibración.

- Probar el modelo y las soluciones:

El modelo desarrollado no sólo se prueba en los diferentes escenarios para evaluarlos y obtener los correspondientes indicadores que proporciona, sino que analizando los resultados se confirma que es razonable y puede utilizarse para los objetivos marcados al inicio.

- Evaluación de las soluciones:

Por último se evalúan las diferentes soluciones mediante los indicadores obtenidos del modelo en términos operacionales, económicos, sociales y ambientales.

Este modelo de decisión entendido como una normativa rígida es adecuado para problemas simples, bien definidos y con unas restricciones claras; en problemas más complejos, multidimensionales y con numerosos componentes se necesita incluir mejoras en el esquema original que permitan hacer frente a un mundo que cambia continuamente.

La mejora propuesta consiste en incluir una función de monitorización que haga que el proceso de planificación sea entendido como un sistema continuo en el tiempo. Tradicionalmente se invierten grandes esfuerzos durante uno o dos años en los cuales se lleva a cabo el estudio del sistema de transporte, pero una vez implementada la solución escogida no continúa evaluándose. La propuesta de la función de monitorización consiste en un seguimiento del problema de transporte que permita actualizar las diferentes etapas de la planificación y proporcione pequeñas modificaciones que aporten aprendizaje y adaptabilidad a la solución.

Este proceso de planificación se ha utilizado como punto de partida para el análisis que se pretende llevar a cabo en este trabajo. De las explicaciones detalladas de cada una de las fases del proceso de planificación clásico se deduce que para cada una de ellas se requiere la inversión de una gran cantidad de recursos, tanto en tiempo como en herramientas, los cuales no se disponen para la realización de este trabajo. Por este motivo, el proceso ha sido adaptado a las condiciones y recursos de un Trabajo Final de Máster individual.

En primer lugar se ha planteado el problema que debe ser analizado, explicado en el apartado anterior, posteriormente se ha examinado la bibliografía correspondiente para definir la metodología de trabajo y el modelo matemático a utilizar para extraer información sobre el comportamiento de la demanda del corredor Barcelona-Vallès.

Una vez determinado el modelo, cuyo proceso se detalla en los apartados posteriores, se ha pasado a la búsqueda de los datos necesarios que lo alimentarán así como los datos reales de demandas con los que se comparará el modelo. Finalmente se hará un análisis utilizando el modelo así como todos los datos que se han ido recopilando.

3.2. Estructura clásica del modelo de transporte

De las etapas de planificación explicadas en el apartado anterior la construcción del modelo es la más complicada técnicamente hablando. Tradicionalmente los modelos de transporte siguen la estructura llamada de las 4 etapas que fue desarrollada principalmente en los años 60, fruto de varios años de experimentación y desarrollo. Desde entonces se han producido múltiples avances en las técnicas de modelado pero la estructura general explicada a continuación sigue siendo un marco de referencia que ha permanecido prácticamente inalterado con el paso de los años, la Figura 9 esquematiza las etapas.

El enfoque del problema parte de tres tipos de información inicial: delimitación de zonas y sistema de redes existentes en las mismas; datos del año base que incluyen para cada una de las zonas niveles de población, actividad económica, o usos del suelo, entre otras; y recolección de datos de las perspectivas de planificación futura.

Estos datos se utilizan posteriormente para estimar el modelo del número total de viajes generados y atraídos por cada una de las zonas de estudio dando lugar a la etapa de *generación de viajes*. El siguiente paso es la asignación de dichos viajes a sus destinos particulares mediante otro modelo, generando de esta manera una matriz correspondiente a la etapa de *distribución de viajes*. Posteriormente interviene la asignación de los viajes a los diferentes modos de transporte, modelización de la *elección modal*. Y Finalmente, se asignan los viajes de cada modo de transporte a las diferentes rutas disponibles mediante los modelos de *elección de rutas*.

Posteriormente a las etapas de modelización se cierra el proceso con la *evaluación* que es el objetivo perseguido del proceso. Una vez calibrado y validado el modelo para el año base se aplica a uno o varios escenarios u horizontes de planificación. Estos escenarios deben ser realistas y consistentes ya que desde la perspectiva política y sin asesoramiento técnico resulta fácil caer en previsiones que

no serían económicamente factibles ni viables en cuanto a previsiones de crecimiento económico. Para aplicar el modelo calibrado a dichos escenarios lo que se hace es volver a aplicar la misma secuencia de modelos a las nuevas condiciones, para posteriormente poder comparar los diversos horizontes posibles y escoger el más adecuado comparando sus costes y beneficios.

Como se ha comentado al inicio, esta estructura es hoy en día un marco de referencia y un punto de partida a la hora de modelar problemas de transporte, sin embargo posee algunos puntos débiles.

El modelo clásico se presenta como una secuencia de cuatro submodelos pero se sabe que las decisiones relacionadas con los viajes no tienen porqué tomarse siguiendo esta secuencia. Por ejemplo, algunos modelos contemporáneos contemplan una sola etapa conjunta para la elección modal y de ruta ya que la disponibilidad de las rutas puede influenciar la elección modal. Otros modelos contemplan en una misma etapa la distribución de viajes entre zonas y la elección modal ya que la elección de un modo de transporte con una infraestructura rígida como podría ser el tren condicionaría el destino. Existen multiplicidad de consideraciones que pueden hacerse dependiendo del problema que se pretende analizar; actualmente, modelos mucho más complejos tratan de solucionar estas incertidumbres.

Este trabajo, como veremos más adelante, se centrará únicamente en la etapa de la elección modal, lo que nos permitirá comparar las demandas de las tres alternativas a analizar.

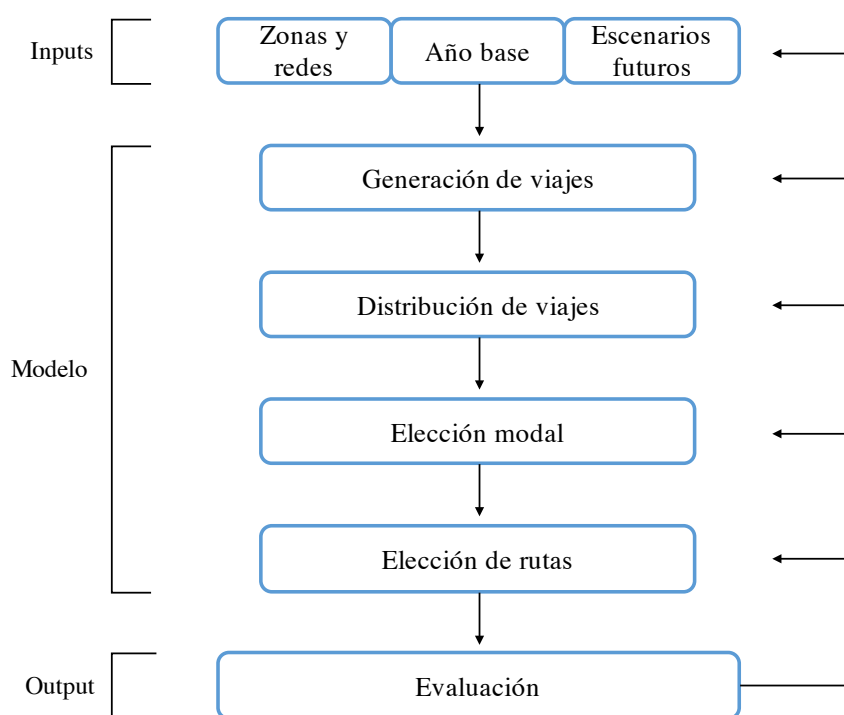


Figura 9. Estructura clásica del modelo de transporte. Fuente: Elaboración propia.

3.3. Consideraciones previas

En este apartado se detallan varias consideraciones relacionadas con el tipo de problema de transporte y los modelos de transporte. A lo largo del resto del trabajo se tendrán en cuenta las diferentes cuestiones a la hora de tomar las decisiones.

- Precisión y exactitud requerida

Cuando hablamos de exactitud nos referimos al nivel considerado aceptable que alcanza un resultado y está relacionado con la calidad del modelo. El nivel de exactitud requerido varía mucho según el caso, por ejemplo, en algunas situaciones la exactitud necesaria es aquella que permita discriminar entre un esquema bueno y otro peor.

La precisión se refiere a las unidades de medida utilizadas para recoger los datos introducidos en el modelo. Por ejemplo, se pueden medir los tiempos de viaje en fracciones de segundo pero en realidad los usuarios tienen internalizadas estas medidas en aproximaciones de minutos. También se debe diferenciar entre la precisión necesaria para datos medidos y datos estimados, por ejemplo, sería correcto decir que el número de viajeros de un día concreto fue 1093 pero no sería correcto decir que el número de viajeros estimado para un día concreto será de 1093, sino que será de unos 1100.

- Contexto de la toma de decisión

Considerar el contexto implica la adopción de una perspectiva particular y la elección de un objetivo determinado para el sistema de interés, ya sea desde el punto de vista estratégico, táctico u operacional. Además esta elección incluirá: elección del nivel de análisis, únicamente transporte o también actividad económica de la zona; focalización solo en la demanda o la oferta también necesita ser analizada; estudios de minimización de costes por parte del usuario y/o por parte del operador; se deben satisfacer diversos colectivos de interés o se tendrá en cuenta un esquema generalizado; etc. Por lo tanto el contexto de la toma de decisión ayudará a la definición de los requerimientos del modelo a ser utilizado y las variables a ser incluidas en el mismo.

- Nivel de detalle requerido

El nivel de detalle requerido para el modelo de un sistema puede ser descrito mediante 4 dimensiones principales: geografía, unidad de análisis, respuestas conductuales y gestión del tiempo.

El espacio es muy importante y puede ser tratado de manera agregada, como una división en grandes zonas o a nivel de detalle con los orígenes y destinos de los viajes bien descritos. Existe un rango muy amplio de opciones en este tema que dependerá de la aplicación del modelo, si estamos hablando de un diseño detallado del tráfico mediante un modelo de microsimulación en una zona muy pequeña sería recomendable tener zonas desagregadas con las características de los links bien definidas, en cambio una planificación estratégica requerirá zonas agregadas con las características de los links definidas en términos de velocidad comercial.

Las unidades de interés para ser modeladas pueden ser desde una gran zona con viajes que salen y entran de la misma hasta personas individuales y entre estas dos opciones podríamos encontrar grupos representativos de la población que viaja.

Las respuestas conductuales pueden variar desde una simple elección de ruta hasta cambios en los horarios, modos de transporte, destinos, frecuencias de viaje o incluso usos del suelo e impactos de actividades económicas.

El tiempo puede ser tratado como una variable discreta o continua. En el primer caso el modelo deberá cubrir un día entero, una hora punta o un intervalo de tiempo menor pero todas las respuestas relevantes tendrán lugar en este periodo de tiempo aunque existan interacciones entre otros periodos. Alternativamente, si se considera como una variable continua, se optará a una gestión más dinámica del tráfico y de las respuestas conductuales como la elección del tiempo de viaje.

- Disponibilidad de datos adecuados

Además de la consistencia de los datos y de las dificultades en predecirlos. En algunos casos existirá mucha cantidad de información; en otros, existirán razones para sospechar que la información sobre futuras predicciones en las variables clave no son fiables dada la inestabilidad del sistema. En muchos casos la información disponible será el factor clave que determinará el modelo.

- Estado del arte en modelización

Se debe tener en cuenta el estado del arte sobre la modelización de la intervención en el sistema de transporte que se analiza. Este hecho puede dividirse en: abundancia de información conductual, manejabilidad matemática y computacional y disponibilidad de algoritmos que proporcionen una buena solución.

Debe tenerse en cuenta que en la práctica todos los modelos asumen que algunas variables son exógenas al mismo. Además, otras muchas variables se omiten de la modelización por diversos motivos, ya sea porque no son relevantes para el objetivo final, porque son muy difíciles de predecir o porque incluirlas en el sistema no aporta ninguna información adicional. Considerar la información que un modelo no tiene en cuenta puede ayudar a decidir su idoneidad para analizar el problema deseado.

- Recursos disponibles para el estudio

Este apartado incluye tanto costes, datos, hardware, software o habilidades técnicas necesarias. Sin embargo hay dos recursos muy importantes: el tiempo y la comunicación con los responsables de las tomas de decisiones.

Si se dispone de poco tiempo para tomar una decisión entre diferentes esquemas probablemente se tendrán que utilizar métodos abreviados. Muchas veces se demandan estudios de modelización de transporte con objetivos muy ambiciosos en plazos temporales muy cortos, ya que se necesitarían años para una correcta implantación del modelo, validación del mismo y análisis de alternativas.

En cuanto a la comunicación con los responsables de la toma de decisiones, aunque dada la naturaleza de este trabajo este punto no se tiene en cuenta en cuenta, es importante para asegurar un correcto nivel de expectativas y mejorar la comprensión de las ventajas y limitaciones del modelo para evitar la aceptación ciega o el completo rechazo de las recomendaciones proporcionadas.

- Requerimientos de procesado de datos

Este aspecto solía ser interpretado como “¿Cuán grande tiene que ser mi ordenador?” la respuesta actualmente es “no muy grande”. El problema real en este punto es la habilidad humana para recolectar, codificar e introducir la información, ejecutar el cálculo e interpretar los resultados. Cuanto más grande sea el nivel de detalle, mayor serán las dificultades de estas tareas.

- Niveles de formación y habilidades de los analistas

Los costes de formación son normalmente muy altos, tanto que muchas veces es preferible utilizar un modelo o software existente que sea entendible a adquirir y aprender a utilizar un modelo más avanzado. Sin embargo, muchas veces merece la pena invertir un poco de tiempo en analizar nuevas técnicas más complejas sin dejar atrás los modelos más sencillos.

- Perspectiva y alcance de la modelización

Se puede dividir el alcance de la modelización en 6 grupos de diferentes procedimiento: localización de actividades, demanda, funcionamiento del sistema de transporte, actuaciones en la oferta, minimización de costes, producción.

Además, estos alcances pueden estudiarse desde tres perspectivas diferentes: Estratégica, la más amplia y agregada cuyos resultados y decisiones tienen impactos a mayor escala y a largo plazo centrada en la adquisición de recursos y diseño de la red; táctica, con una perspectiva más acotada y centrada en cuestiones como determinar el mejor uso de la infraestructura e instalaciones existentes; y operacional centrada en problemas a corto plazo de los proveedores de servicios.

3.4. Teoría vs práctica

Uno de los temas recurrentes en la modelización del transporte es la distancia que existe entre los teóricos y lo que llevan las acciones a la práctica. Éstos últimos, ante la disyuntiva de elección de un modelo teóricamente robusto y bien elaborado pero difícil de implementar o un modelo más pragmático que dé respuestas más simples en un corto periodo de tiempo siempre escogerá la segunda opción. Sin embargo, la elección entre unos u otros tipos de modelos no siempre es evidente. A continuación se detallan algunas de las razones que llevan a elegir unos u otros modelos.

3.4.1. Razones para escoger modelos teóricos más complejos

- Garantizar resultados estables. A menudo, en los modelos más simples, se proporcionan unas directrices de uso, como por ejemplo solo utilizar en condiciones descongestionadas, o realizar más de un número determinado de iteraciones.
- Para garantizar consistencia. A la hora de aplicar modelos diferentes, por ejemplo de elección modal, en una parte de la población y un modelo diferente en otras zonas se debe tener mucho cuidado en caso de hacerse con modelos simples, ya que probablemente los resultados no sean consistentes, sin embargo, si los diferentes comportamientos están englobados dentro de un mismo modelo teóricamente más robusto y complejo es muy posible que se asegure la bondad de los resultados.
- Para dar confianza en las predicciones. Es prácticamente siempre posible ajustar un modelo a una situación existente, sin embargo puede que los valores futuros que este prediga no siempre tengan sentido, una posible causa sería la correlación entre variables. Por ejemplo, puede existir una correlación muy fuerte entre la producción de bananas y la posesión de vehículo privado en un país concreto, que puede desaparecer cuando el aceite es descubierto. Por este motivo los modelos deberían estar respaldados por bases teóricas que expliquen el comportamiento de los viajes y que aseguren su validez en el futuro.
- Para entender las propiedades de los modelos y desarrollar algoritmos mejoradas para proporcionar soluciones concretas. En el momento en el que se están aplicando determinados modelos que conllevan elevadas complejidades matemáticas, se da por hecho que se dispone de un buen equipo experto en estos temas que podría además particularizar la solución, y mejorar el modelo en general.
- Para entender mejor qué puede asumirse constante y qué puede ser aceptado como variable para un contexto de decisión y un nivel de análisis concretos. Por ejemplo para estudios tácticos a corto plazo la hipótesis de suponer una matriz de viajes fija es razonable, sin embargo, incluso en estos estudios a corto plazo si las decisiones que son evaluadas mediante el modelo implican grandes cambios en las políticas tarifarias o en la accesibilidad esta hipótesis podría dejar de ser válida.

3.4.2. Razones para no escoger modelos teóricos complejos

- Son demasiado complejos. Esto implica que los modelos más sencillos son normalmente preferidos ya que los resultados de los mismos deben poder ser interpretados por todo el mundo implicado en los procesos de toma de decisiones, lo que lamentablemente no suele ocurrir con los modelos más

complejos. La solución a este punto consistiría en proporcionar publicaciones con notación más asequible y la posibilidad del uso de softwares informáticos más intuitivos.

- Los modelos teóricos requieren de datos que no suelen estar disponibles y que además son caros si se pretende recogerlos en el campo. Aunque actualmente esta tendencia está cambiando dada la aparición de las nuevas tecnologías y el big data.
- Es mejor trabajar con matrices reales que con modelos que predicen los desplazamientos. Esto se traduce en que suele ser mejor trabajar con datos reales y modificarlos para las predicciones futuras que utilizar puramente la modelización mediante las 4 etapas desde el principio.
- Los modelos teóricos complejos requieren un nivel de calibración muy elevado. Lo que implica que los costes se incrementan, se necesitan datos reales muy concretos y unas habilidades elevadas para llevar a cabo estos procesos.
- Suele ser más eficiente utilizar siempre el mismo tipo de modelo para el análisis de varios problemas, ya que de esta manera se consigue tener una técnica más depurada fruto del aprendizaje realizado en otros análisis.

Las razones expuestas en este apartado son precisamente las que han sido determinantes para escoger el modelo a utilizar en este trabajo. Los modelos teóricos más complejos no son factibles para realizar el análisis en un Trabajo Final de Máster ya que requieren una cantidad de recursos y habilidades no disponibles. Se ha optado por un modelo sencillo que permita obtener a grandes rasgos las características de la demanda que circula por el corredor Barcelona – Vallès.

4. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO ANALÍTICO

Una vez entendidas las bases de la modelización del transporte, así como las consideraciones que se deben tener en cuenta a lo largo de todo el proceso, se procede en este apartado a determinar el modelo analítico más adecuado que permita proporcionar la información necesaria para el análisis de la demanda del corredor Barcelona – Vallès.

En primer lugar se hace la distinción entre modelos agregados y desagregados y se determina qué tipo de modelo es más adecuado para la situación que se desea estudiar. Posteriormente se determinan las condiciones de contorno que proporciona la etapa de elección modal y finalmente se detalla el modelo escogido.

4.1. Modelos agregados o desagregados

Los modelos de elección modal son agregados si utilizan información a nivel zonal que engloba el comportamiento de un gran grupo de personas, en cambio, son desagregados si utilizan información basada en unidades familiares o datos individuales.

El nivel de agregación de los datos es algo que se debe determinar en las primeras fases del modelado y normalmente viene condicionado por la disponibilidad de los mismos. Se debe tener en cuenta que a la hora de utilizar datos agregados se suelen introducir parte de los datos exógenos inevitablemente, es decir, información diferente a la estrictamente relacionada con el viaje como podrían ser preferencias personales.

Predecir la demanda futura es un elemento crucial en la mayoría de estudios de transporte. Ser capaz de predecir el uso probable de las futuras instalaciones es un precursor esencial de la toma de decisión racional sobre las ventajas o desventajas de proporcionar dichas instalaciones. También puede ser importante tener una idea de la sensibilidad de la demanda a variables importantes bajo el control del analista, como puede ser el precio a pagar. En la mayoría de los casos las predicciones y la sensibilidad estimada pueden ser proporcionadas a un nivel agregado lo que significa que deben representar el comportamiento de la población de interés. Y son precisamente estas consideraciones generales las que corresponden al tipo de análisis que se pretende realizar en este trabajo.

Los modelos agregados se usaron prácticamente sin excepción en estudios de transporte hasta finales de los 70, se convirtieron en familiares y demandaban relativamente pocas habilidades por parte del analista. El output de estos modelos, quizás porque eran generados por programas de ordenador poco conocidos, fue considerado normalmente más preciso de lo debido, por ejemplo a la hora de predecir movimientos de flujo a 15 años vista, lo que ha proporcionado desconfianza en este tipo de análisis.

Los modelos desagregados, los cuales fueron muy populares durante los años 80, ofrecen sustanciales ventajas frente a los modelos tradicionales mientras que se mantienen prácticos en

muchas aplicaciones. Sin embargo, un problema importante en la práctica es que requieren que el analista posea un nivel alto de habilidades probabilísticas y econométricas, en particular para la interpretación de los resultados. Además, muchas aproximaciones desagregadas que han adoptado tratamientos sofisticados de las elecciones y las restricciones a las que se enfrentan los viajeros han fracasado a la hora de producir predicciones, muchas veces porque requieren de datos que no pueden ser predichos razonablemente.

Intentos anteriores de clarificar el tema de si es preferible utilizar modelos agregados o desagregados y en qué circunstancias, han concluido básicamente en que no existe una aproximación definitiva apropiada a todas las situaciones.

A modo de guía se puede concluir que los modelos desagregados son superiores para casos en que los comportamientos individuales difieran mucho entre zonas y grupos de personas ya que tratan adecuadamente esta información, mientras que los modelos agregados proporcionan una primera aproximación adecuada a las diferentes problemáticas a analizar con un coste reducido.

Dado que en el análisis que se pretende realizar en el presente trabajo recoge datos de una misma zona donde las características de la población pueden asumirse parecidas, y debido a la falta de datos desagregados, se ha decidido trabajar con un modelo agregado. No se entrará a analizar en este trabajo los modelos desagregados.

4.2. Etapa de elección modal

La elección del modo de transporte es probablemente una de las etapas del modelo clásico de transporte más importantes dentro del proceso de planificación del transporte debido al importante papel que tiene el transporte público en la formulación de políticas. Prácticamente si excepción viajar en transporte público supone utilizar el espacio de la ciudad de una manera mucho más eficiente además de producir menos accidentes y emisiones que el transporte privado. Además, si algunos conductores pueden ser persuadidos para usar el transporte público en vez del vehículo privado el resto de usuarios de la calzada se verán beneficiados con unos niveles de servicio mejorados. Es prácticamente imposible acomodar a todos los propietarios de vehículos privados que desean utilizarlos en la ciudad sin sacrificar enormes espacios del tejido urbano en calzadas y párquines.

Por lo tanto, es importante desarrollar y usar modelos que sean sensibles a los atributos que influyen las elecciones modales individuales. En nuestro caso se analizarán estos cambios de elección mediante modificaciones de la función de utilidad del usuario, es decir de los Costes Generalizados.

Una manera sencilla de definir los modelos de elección modal es la siguiente. Un usuario pretende ir a un destino concreto, para ello, dispone de varias rutas alternativas, algunas de ellas involucran únicamente conducir el transporte privado mientras que en otras se requiere andar hacia una estación o parada, viajar en el transporte público pertinente, bajar en la estación deseada para realizar un transbordo y/o andar hasta el destino. Este usuario escogerá la opción con el coste generalizado inferior, si todo el mundo piensa de la misma manera se tendrá un modelo de rutas todo o nada, sin embargo la realidad es más complicada debido a:

- Algunas personas no dispondrán de coche, por lo tanto sus opciones serán más limitadas, esta será la mínima segmentación requerida.
- La congestión, tanto en el transporte público como en el transporte privado, convierten la elección de determinadas rutas en una necesidad.

- Los Costes Generalizados no pueden pretender capturar todos los elementos que determinan una elección modal, esto es particularmente relevante en el caso de elecciones de coche o transporte público que se focalizan en parámetros adicionales a los relevantes de elección de ruta.
- Personas diferentes percibirán los costes de diferentes maneras y buscarán minimizar una versión diferente de los Costes Generalizados. Por lo tanto, debemos permitir un cierto grado de dispersión en las elecciones que considerarán otros factores que no son completamente visibles para el analista en las preferencias modales.
- Los costes modelados en un modelo basado en zonas tienen en cuenta datos medios, ya que por ejemplo alguien que viva más próximo a una estación o parada puede verse más inclinado a utilizar el transporte público.

Teniendo en cuenta estas características en relación a los Costes Generalizados se determinarán los mismos para cada una de las alternativas en apartados posteriores.

4.2.1. Factores que influyen la elección modal

Características del viajero. Estas características se consideran importantes.

- Disponibilidad de coche o posesión del mismo.
- Posesión de carnet de conducir.
- Estructura familiar: pareja joven, pareja con hijos, jubilados, solteros.
- Ingresos.
- Condicionantes: necesidad del coche en el trabajo, llevar a los hijos al colegio.
- Densidad residencial.

Características del viaje. Estas características influyen fuertemente la elección modal.

- Propósito del viaje. Los viajes hacia el trabajo son normalmente más fáciles de hacer en transporte público debido a la regularidad y posibilidad de ajuste del mismo.
- Hora del día. Los viajes realizados en hora punta son más fáciles de acomodar en transporte público.
- Viaje solo o compartido.
- Características del servicio de transporte.
- Elementos cuantitativos: tiempo de viaje, componentes monetarios, parking, fiabilidad y regularidad del transporte.
- Elemento cualitativos: confort, conveniencia, seguridad, protección, oportunidad de realizar otras tareas durante el viaje.

4.3. Elección del modelo

A la hora de determinar la metodología con la que modelizar la demanda del corredor Barcelona – Vallès se ha partido de la base explicada en este capítulo y en el anterior. Primeramente se ha determinado el proceso de planificación en el que se enmarca la modelización, se ha determinado la base de la modelización clásica, así como las consideraciones que se deben tener en cuenta a la hora de utilizar un modelo y a la hora de escogerlo.

Posteriormente se ha determinado que la mejor opción es un modelo agregado sencillo y únicamente centrado en la etapa de elección modal que permita el análisis de tres alternativas basado en los Costes Generalizados. El único modelo que responde a este conjunto de características es el modelo Logit Multinomial, explicado a continuación.

Podrían utilizarse otros modelos más complejos, sin embargo todos corresponden al ámbito de los modelos desagregados. Aunque lo realmente interesante sería poder analizar el corredor mediante algún software específico, ya que hoy en día éstas son las herramientas más potentes de modelización.

Un ejemplo es el software TransCAD, que entre sus múltiples funciones es internacionalmente utilizado para la estimación de la generación y distribución de viajes, modelos de distribución modal y procesos de asignación. Además los modelos que utiliza para la asignación de tráfico se basan en funciones de Costes Generalizados para la evaluación de problemas de transporte multimodal o de competencia entre diferentes modos de transporte.

Aunque no se disponga de la citada herramienta para realizar el análisis, su funcionamiento interno corrobora la buena elección del modelo.

4.3.1. Modelo Logit Multinomial

En este trabajo, para analizar la decisión de elección de modo de transporte se ha optado por el Modelo Logit Multinomial agregado. El modelo asigna unas probabilidades de elección a cada uno de los modos de transporte a partir de los Costes Generalizados. Los individuos escogerán el modo de transporte que más satisfacción les proporcione y esta satisfacción estará representada por los Costes Generalizados (CG).

En nuestro caso, que tenemos 3 modos de transporte:

$$P_1 = \frac{\exp(CG_1)}{\exp(CG_1) + \exp(CG_2) + \exp(CG_3)}$$

El coste generalizado de un modo de transporte engloba todos los inconvenientes que un usuario percibe al viajar de manera monetarizada entre un origen y un destino. Se compone de la suma de los costes monetarios sufragados directamente por el usuario (peajes, tasas, gasolina...) y el valor del tiempo empleado en el viaje calculado en unidades monetarias equivalentes.

Carretera de peaje:

$$CG_p = T_p + O + VdT(a_3 \cdot t_{cp} + t_{np})$$

Donde:

T_p : Tasa del peaje.

O : Costes de operación del vehículo.

VdT : Valor del Tiempo.

a_3 : Factor de ponderación del valor del tiempo de congestión.

t_{cp} : Tiempo de viaje en congestión.

t_{np} : Tiempo de viaje sin congestión.

Carretera convencional:

$$CG_c = O + VdT(a_3 \cdot t_{cc} + t_{nc})$$

Donde:

O : Costes de operación del vehículo.

VdT : Valor del Tiempo.

a_3 : Factor de ponderación del valor del tiempo de congestión.

t_{cc} : Tiempo de viaje en congestión.

t' : Tiempo de viaje sin congestión.

Ferrocarril:

$$CG_f = T_f + VdT(a_2 \cdot t_a + a_1 \cdot t_e + a_4 \cdot t)$$

Donde:

T_f : Tasa del billete de tren.

VdT : Valor del Tiempo.

a_2 : Factor de ponderación del valor del tiempo andando.

t_a : Tiempo de acceso a la estación.

a_1 : Factor de ponderación del valor del tiempo de espera.

t_e : Tiempo de viaje en espera

a_4 : Factor de ponderación del valor del tiempo en vehículos concurridos.

t : Tiempo de viaje.

5. RECOPIACIÓN DE DATOS

En este apartado se presentan las diversas metodologías utilizadas para la obtención de datos a introducir en el modelo, así como sus valores definitivos.

Primeramente se establecen las hipótesis y consideraciones iniciales que delimitarán las condiciones del estudio, posteriormente se dedican apartados a cada uno de los valores necesarios para el cálculo de los Costes Generalizados de cada una de las tres alternativas y por último se muestra el resumen de los datos definitivos.

5.1. Consideraciones iniciales

Antes de comenzar a dar valores a cada una de las variables de los Costes Generalizados se deben exponer las diversas consideraciones realizadas que determinarán la obtención de los datos.

5.1.1. Hora punta y motivos ocupacionales

La problemática presentada en el presente trabajo tiene lugar durante la hora punta de la mañana de manera que todos los datos harán referencia al periodo comprendido entre las 7:00 y las 10:00 a.m. Se escoge esta franja horaria ya que mediante históricos de congestión disponibles en las diferentes aplicaciones de predicción de tráfico como pueden ser Google Maps o Infotransit del RACC, datos contrastados con la propia experiencia, se conoce que la congestión de las vías analizadas comienza a partir de las 7:30 a.m. y las colas no se disipan hasta las 9:30 a.m. Puesto que la mayoría de datos se proporcionan en franjas de una hora se amplía el periodo punta en las horas correspondientes.

Además, como se justifica a continuación, esta congestión es debida a los desplazamientos por motivos ocupacionales; ya que presentan un rango de horas de desplazamiento muy limitado y se entiende que la movilidad con motivos de ocio se adaptará a las horas sin congestión para evitar colas e incomodidades debido a su mayor flexibilidad.

En la Figura 10 se representa, en millones de desplazamientos, la distribución horaria de los desplazamientos producidos en toda la población residente en el ámbito territorial del Sistema Tarifario Integrado, lo que significa que incluye todos los modos de transporte y desplazamientos tanto intercomarcales como intracomarcales. Se puede observar que la movilidad producida por motivos ocupacionales, representada en fucsia, tiene su periodo punta durante la mañana, coincidiendo con la franja horaria seleccionada.

La movilidad por motivos personales, representada en naranja, alcanza niveles bastante elevados hacia el final de la franja horaria de estudio, este hecho podría conducir a pensar que la congestión en el periodo observado también será producida por los desplazamientos con motivos personales, sin embargo se deben tener en cuenta las siguientes características de los datos.

La distribución por modos de transporte según el motivo de viaje es muy diferente, el caso de estudio incluye vehículo privado y transporte público, medios en los que se realizan el 80% de los desplazamientos con motivos ocupacionales mientras que tan solo se realizan mediante estos modos de transporte el 40% de los desplazamientos por motivos personales, tal y como explica la Figura 11. Este hecho disminuye considerablemente la influencia de la movilidad personal en la franja de estudio representada en la Figura 11. Además, se debe tener en cuenta que los desplazamientos con motivos personales suelen ser de carácter intermunicipal y de ahí la explicación de que no se produzcan en los modos de transporte objeto de este estudio.

Que los desplazamientos se produzcan por los motivos expuestos implica que el único valor del tiempo a considerar para los Costes Generalizados es el valor del tiempo con motivos de trabajo y estudios que se definirá en apartados posteriores.

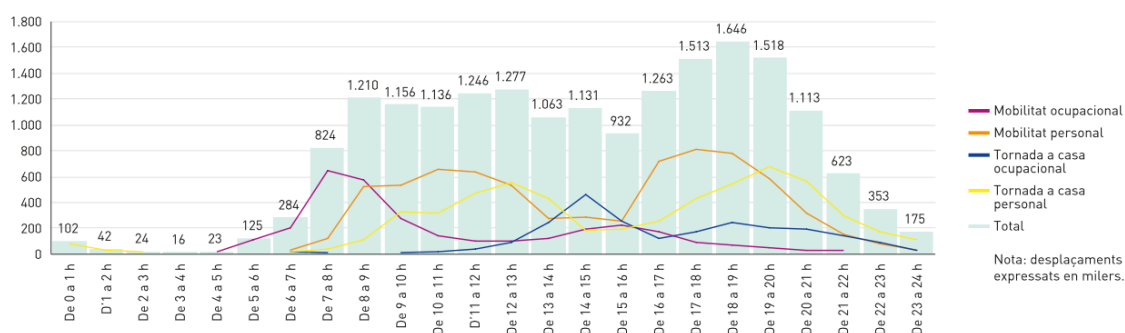


Figura 10. Distribución horaria de los desplazamientos. Fuente: EMEF 2015.

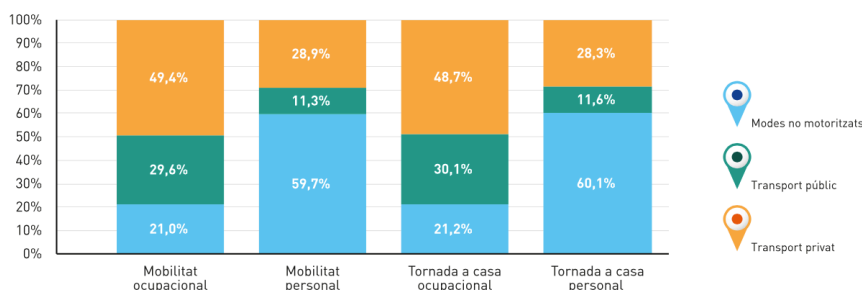


Figura 11. Motivo del desplazamiento y modo de transporte. Fuente: EMEF 2015.

5.1.2. Origen y destino

El estudio pretende analizar el comportamiento de la demanda en el corredor Barcelona – Vallès, para conseguir este objetivo y determinar los datos concretos de los Costes Generalizados debemos escoger un origen y un destino al que hagan referencia.

La demanda que se analiza en este trabajo tiene orígenes y destinos diferentes, pero nos referimos a aquella demanda que se encuentra ante la disyuntiva de ir mediante la línea de tren de Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya, la carretera de peaje Túneles de Vallvidrera o la carretera convencional de Vallvidrera.

Se toman como referencia las entradas a la carretera de peaje Túneles de Vallvidrera, marcadas con su correspondiente numeración en rojo en la Figura 12. Estas entradas a la carretera de peaje también marcan la entrada a la carretera de Vallvidrera ya que ésta se coge en la salida 7 de los Túneles de Vallvidrera, marcada con su correspondiente numeración en azul en la Figura 12, de esta manera el recorrido de la carretera convencional coincide con el de la carretera de peaje de la salida 10 a la 7.

La segunda referencia que se toma son las estaciones de Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya cercanas a las entradas de la 8 a la 12: Hospital General, Mira-sol, Sant Joan, Volpelleres, Sant Cugat, Valldoreix y La Floresta. Estas estaciones de FGC son todas las que están incluidas dentro del término municipal de Sant Cugat del Vallès y la distancia en coche desde cada una de ellas hasta una entrada a la carretera de peaje Túneles de Vallvidrera es inferior a 5 minutos, tal y como indica la Tabla 4.

Estación	Minutos	Kilómetros
Hospital General	4	2,0
Mira-sol	1	0,5
Sant Joan	5	2,4
Volpelleres	4	1,8
Sant Cugat	4	1,9
Valldoreix	4	2,3
La Floresta	5	1,7

Tabla 4. Distancias en km y min desde las estaciones de FGC a entradas de Túneles Vallvidrera. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Google Maps.



Figura 12. Origen de la demanda. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Google Maps.

Mediante esta información se establece un punto medio, usado como centro del área de influencia, desde el que se calcularán tiempos y distancias. Se cogen puntos medios tanto de las entradas como de las estaciones ya que aquellos usuarios que entren en una entrada o estación anterior compensarán sus mayores costes con aquellos que entren por entradas o estaciones posteriores. De esta manera obtenemos unos Costes Generalizados medios para el sistema.

Dado que todos los usuarios de las carreteras entran mediante las entradas de la 12 a la 8 y dado que entre estas dos entradas hay 5 km y justo en medio encontramos la entrada 10, se tomará esta entrada como origen a la que se le añadirá posteriormente la distancia y el tiempo desde el domicilio.

En cuanto a la estación de FGC de referencia para el cálculo de tiempos y distancias será Sant Cugat, esta estación es el punto donde se encuentran las dos bifurcaciones de la línea, y además las distancias medidas en tiempo desde Sant Joan o desde Hospital General hasta Sant Cugat son 5 minutos y desde Sant Cugat hasta La Floresta otros 5 minutos. Igual que en el caso anterior, a este punto de origen se le añadirá posteriormente la distancia y el tiempo desde el domicilio.

Los dos puntos de origen escogidos coinciden con la entrada a la carretera y la estación con más demanda, obteniendo de esta manera resultados aún más fiables.

Determinar el destino concreto de la demanda que analizamos no es sencillo. Conocemos el punto de convergencia de los tres modos de transporte analizados, Sarrià. Los Costes Generalizados asociados a la continuación del trayecto más allá de Sarrià serán diferentes, sin embargo tenderán a ser parecidos.

Aquella parte de la demanda que continúe su trayecto más allá de Sarrià en tren, probablemente tendrá costes de transbordos y de caminar hasta el destino final, aquellos que recorran esa distancia en coche tendrán elevados costes de congestión.

Dado que no se disponen de datos sobre los destinos de la demanda que analizamos para posteriormente poder calibrar el modelo, se toma como destino final el punto de convergencia de las tres vías analizadas, lugar al que sabemos seguro que llegan todos los usuarios.

5.1.3. Equilibrio de Vickrey

Todas las mañanas se produce la misma congestión, es decir son los mismos usuarios los que a diario realizan el mismo viaje a la misma hora, este hecho indica la existencia de un equilibrio dentro de cada uno de los itinerarios escogidos.

A continuación se presenta la teoría de Vickrey, que analiza la existencia de este equilibrio en relación a los desplazamientos durante la hora punta de la mañana. La teoría se basa en el hecho de que ningún usuario puede mejorar sus Costes Generalizados de viaje aunque modifíquese su comportamiento saliendo antes o después de casa. De esta manera se explica la repetición de la congestión de la misma manera diariamente.

Mediante el gráfico de la figura Figura 13 se explica el comportamiento de los viajes realizados en hora punta por las mañanas. Se analizan únicamente los costes en relación al tiempo, debido a que todos los usuarios viajan en el mismo modo de transporte y por la misma ruta, el resto de costes pueden asumirse iguales para todos.

Suponemos que tenemos una ruta por la que cada mañana pasan una determinada cantidad de coches conocida, que deben atravesar un determinado punto donde se produce congestión, y que la tasa coches por hora a la que estos coches consiguen salir del punto de congestión también es conocida. Además, conocemos la hora deseada de llegada de los usuarios a sus destinos, para simplificar se

asume que al destino se llega una vez se sale de la congestión y se asume que la hora de salida de casa es la de llegada a la congestión.

Con esta información construimos el gráfico de la Figura 13. En azul se representa la cantidad de coches que van saliendo de la congestión de manera constante, en verde la cantidad de coches que van llegando a la congestión con una pendiente creciente al principio y que va suavizándose a medida que avanza la mañana, es precisamente esta pendiente creciente superior a la de salida la que provoca la acumulación de coches y por tanto la congestión. La curva verde de llegadas es una incógnita que se construye gracias al equilibrio. En rojo se representa la hora a la que desearían llegar los coches a su destino.

A modo de ejemplo, en nuestro caso, estos datos podrían corresponder a la cantidad de coches que van llegando a la carretera de peaje siendo esta cantidad superior a la capacidad de absorción que tiene Barcelona a la salida de esta carretera durante la hora punta de la mañana.

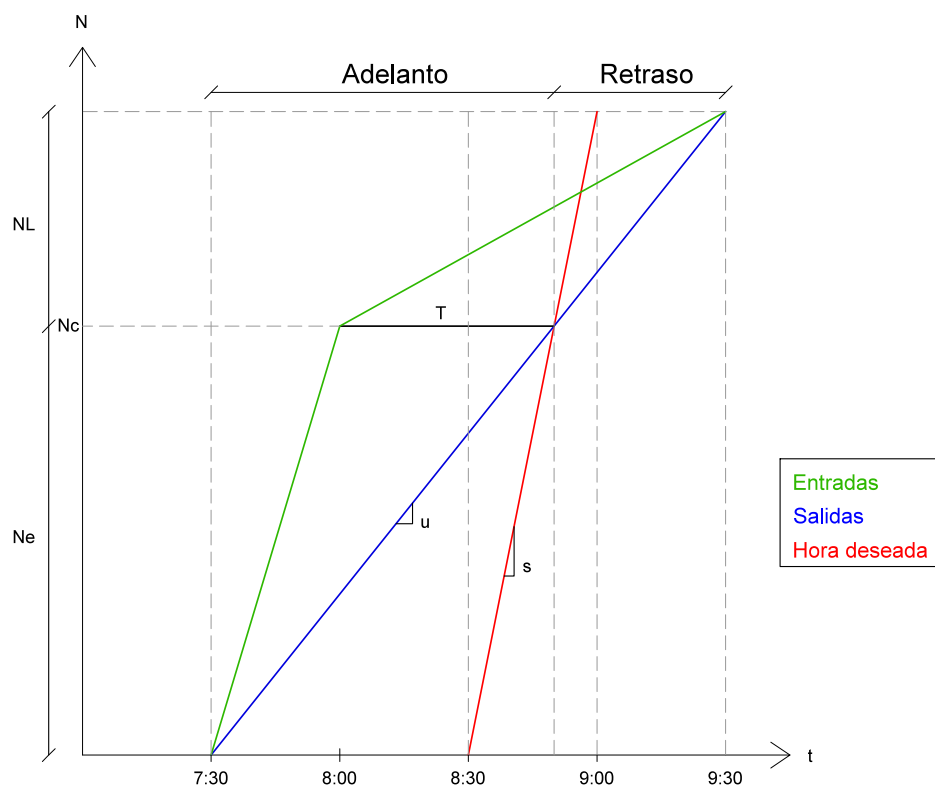


Figura 13. Teoría de Vickrey. Fuente: Elaboración propia.

Si nos fijamos en el usuario crítico (N_c), éste es el usuario que más tiempo pasa en la congestión (T) pero sale de ella a la hora deseada de llegada, es decir llega al destino justo en el momento deseado; sus Costes Generalizados de viaje son únicamente los del tiempo pasado en congestión.

Si este usuario crítico decidiese salir más tarde, por ejemplo el último, cuando ya no hay congestión, no tendría costes de congestión pero sí de retraso respecto a su hora deseada de llegada, este tiempo está señalado en el gráfico como “retraso”. Lo mismo ocurriría si decidiese salir el primero, no tendría costes de congestión pero sí de adelanto respecto su hora deseada de llegada, este tiempo está señalado en el gráfico como “adelanto”.

La situación de equilibrio nos permite hacer la siguiente afirmación: los Costes Generalizados del usuario crítico son los mismos tanto si pasa el mayor tiempo en la cola como si tiene el mayor tiempo de adelanto o de retraso.

$$\beta T = \beta_L \cdot \frac{N_L}{\mu} = \beta_e \cdot \frac{N_e}{\mu}$$

Donde:

μ : Tasa a la que los usuarios salen de la congestión

β : Valor del tiempo en congestión

β_L : Valor del tiempo de retraso

β_e : Valor del tiempo de adelanto

N_L : Número de usuarios con retraso

N_e : Número de usuarios con adelanto

N_c : Usuario crítico

$\frac{N_L}{\mu}$: Tiempo máximo de retraso de N_c

$\frac{N_e}{\mu}$: Tiempo máximo de adelanto

T : Tiempo máximo de congestión

Mediante estas ecuaciones, conociendo la tasa a la que los usuarios salen de la congestión, el número de usuarios total que circula durante la hora punta de la mañana y los valores del tiempo de retraso y congestión, podemos construir el gráfico de Figura 13. Esto nos permite conocer el máximo tiempo en la cola, el máximo adelanto y el máximo retraso así como el número de usuarios que sufren cada uno de ellos.

En este trabajo además, se hace la suposición de que los tiempos deseados de llegada de los usuarios de las rutas a estudiar son muy similares, por tanto la pendiente de la hora deseada de llegada “s” es bastante vertical lo que implica que los Costes Generalizados de todos los usuarios van a ser muy similares y por lo tanto asumimos aquí que son iguales. Este hecho implica que los Costes Generalizados que se introducirán en el modelo son los del usuario que más tiempo pasa en la cola, valor más sencillo de encontrar ya que sólo se tiene que tener en cuenta el tiempo pasado en congestión, y no de adelanto o de retraso.

5.2. *Valor del tiempo (VdT)*

Los términos a incluir en el cálculo de los Costes Generalizados de cada uno de los modos de transporte serán diferentes, sin embargo el valor del tiempo de los usuarios será el mismo. Este dato es una de las variables más importantes y controvertidas de la determinación de los Costes Generalizados del transporte. Para obtener valores lo más próximos a la realidad se debería hacer un estudio específico con un alto nivel de detalle para el caso que nos ocupa, aquí se tomarán valores de referencia dado que los recursos son limitados y este estudio podría dar lugar a otro trabajo como el que se presenta.

Los métodos utilizados para determinar este valor pueden ser o basados en encuestas mediante el método de preferencias declaradas o reveladas, o en el enfoque de ahorro de costes. Éste último está basado en la teoría clásica de productividad marginal, el tiempo empleado en el desplazamiento al trabajo podría ser utilizado de manera productiva; por eso es comúnmente utilizado para determinar el valor del tiempo con motivos de trabajo. A partir de la premisa en que se basa se calcula cuál sería esta productividad mediante las estadísticas nacionales que establecen los salarios de la región o del país a partir del coste por hora observado en los diferentes sectores, posteriormente se ajusta este coste por hora con costes adicionales como vacaciones, tasas de empleo, pensiones o seguridad social entre otros.

Según el motivo del desplazamiento el valor del tiempo es diferente, en caso de otros motivos como pueden ser compras, tiempo libre o gestiones no existe un procedimiento tan estandarizado de manera que suelen utilizarse las encuestas.

Para este trabajo se ha consultado el Manual del Sistema d’Avaluació d’Inversions en Transport (SAIT) de 2015, del Departament de Territori i Sostenibilitat para las evaluaciones socioeconómicas realizadas sobre las principales actuaciones viarias y ferroviarias impulsadas por la Direcció General

d'Infraestructures de Mobilitat Terrestre. En este documento se establecen los valores de referencia de valor del tiempo mostrados en la Tabla 5. Como ya se ha determinado en este trabajo se utiliza el valor del tiempo con motivos de desplazamiento por trabajo y estudio, de manera que el valor de referencia del VdT es 9,22€/h.

Motivo	€/h
Trabajo y estudio	9,22
Compras	7,89
Ocio	6,28
Gestiones	13,36
Promedio	9

Tabla 5. Valor del Tiempo de referencia. Fuente: SAIT.

Se debe tener en cuenta que el Valor del Tiempo presenta enormes complejidades teóricas aún por resolver debido a su heterogeneidad por múltiples factores:

- Mercado laboral

El enfoque de ahorro de costes supone que el salario bruto en el mercado de trabajo es igual al producto de valor marginal que produce el trabajo. Sin embargo, este no es el caso cuando existen distorsiones del mercado de trabajo. Por lo tanto, se pueden aplicar ajustes para reflejar el nivel de desempleo en el país o región y el valor estimado del tiempo corregido por el salario sombra. Dado que estos datos son difíciles de estimar no se tendrá en cuenta este hecho.

- Sector

Bajo el enfoque de ahorro de costes, el valor económico del ahorro de tiempo de trabajo es la productividad marginal de la persona que realiza el ahorro; por lo tanto diferentes trabajadores tendrán diferentes valoraciones de tiempo. Idealmente, los valores del tiempo deben ser desarrollados para cada clasificación de trabajadores. Sin embargo, para que la evaluación económica funcione a este nivel de desagregación también requiere que la previsión de la demanda esté desagregada de la misma manera. Puesto que el análisis de la demanda se hace de manera agregada no se tendrán en cuenta los diferentes valores por sectores de empleo.

- Tiempo caminando y tiempo de espera

Siendo el resto de atributos iguales, un individuo prefiere pasar el tiempo de viaje dentro de un vehículo antes que caminando, esperando o haciendo transbordos entre servicios. Esto se ve corroborado por el hecho de que el tiempo utilizado en caminar es menos productivo que el tiempo pasado realizando alguna actividad dentro del vehículo. La magnitud exacta de la diferencia entre estos tiempos depende de las culturas y características nacionales, para poder reflejar estas situaciones en este análisis se cogerán valores estandarizados.

- Distancia de viaje

A medida que aumenta la duración del trayecto también aumenta el coste marginal del tiempo empleado en él, es decir menor importancia tienen pequeños ahorros de tiempo y mayor importancia tienen los diferentes propósitos de viaje. En la práctica estas situaciones son raras, de modo que se utiliza un único valor del tiempo de viaje independientemente de la distancia, aunque en los casos en que los datos locales o nacionales indiquen estas diferencias deberán ajustarse los valores. En este análisis, dado que los tiempos empleados en cada modo de transporte son similares no se tendrá en cuenta este hecho.

▪ Condiciones de viaje

La comodidad asociada a las condiciones de viaje e incluida la capacidad del viajero para aprovechar el tiempo que pasa viajando también afecta al valor del tiempo. Este hecho engloba situaciones desagradables como la conducción en condiciones de congestión, ser pasajero de un vehículo atrapado en una cola o viajar en transportes públicos demasiado concurridos. Para reflejar este hecho se utilizarán valores de referencia.

Con el fin de tener en cuenta esta variabilidad del valor del tiempo de viaje se ha consultado el documento Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment (HEATCO) que proporciona los factores de ponderación a aplicar al VdT de referencia en cada una de las situaciones comentadas en los párrafos anteriores. La Tabla 6 resume los datos finalmente seleccionados.

Motivo	Nomenclatura	Factor ponderación	€/h
Trabajo y estudio	VdT	1	9,22
Espera	a_1	2,5	23,05
Andando	a_2	2	18,44
Congestión	a_3	1,5	13,83
Vehículos concurridos	a_4	1,5	13,83

Tabla 6. Factores de ponderación VdT. Fuente: HEATCO.

5.3. Tiempos

En este apartado se detallan los tiempo de viaje que se incluirán en el modelo. En cuanto a las carreteras necesitamos los tiempos de acceso desde casa hasta el acceso a la carretera y el tiempo de viaje en condiciones congestionadas y normales. Para la línea de tren se necesita el tiempo de acceso desde casa hasta la estación de tren, el tiempo de espera y el tiempo de viaje. Se toman tiempos de viaje medios cuyos cálculos se detallan en cada apartado.

5.3.1. Carretera de peaje

Por los motivos anteriormente explicados se toma el viaje del usuario que más congestión encuentra. Mediante la herramienta Google Maps se conoce el tiempo que un usuario tarda en recorrer la ruta en condiciones normales. En la Tabla 7 se muestra el tiempo y la distancia recorrida y además se calcula la velocidad media.

Posteriormente, mediante los históricos de tráfico de la misma herramienta se extrae la información del viaje en condiciones de congestión, que se divide en el tiempo propiamente de congestión cuyas condiciones son molestas para el conductor ya en que los coches están prácticamente parados, y en el tiempo que se tarda en recorrer el resto de la ruta sin estas condiciones molestas. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 7.

Estos datos hacen referencia al tiempo que se tarda en recorrer la ruta desde la entrada 10 de la carretera Túneles de Vallvidrera hasta el destino final, la estación de Sarrià en Barcelona.

	Hora valle	Hora punta	
Condiciones	Normal	Congestión	Normal
Distancia Km	10	5,3	4,7
min	9	25	10
h	0,15	0,42	0,17

Tabla 7. Tiempos de viaje en la carretera de Peaje. Fuente: Google Maps.

De manera separada se han calculado los tiempos de acceso medios de un usuario desde su casa hasta la entrada más cercana a la carretera Túneles de Vallvidrera para tener el ciclo completo de origen a destino. En la Figura 14 se muestran los barrios y sus centros desde los cuales se calcula el tiempo de acceso a la entrada más cercana. Mediante la herramienta tráfico de Google Maps se han buscado los tiempos de acceso durante la hora punta de la mañana, concretamente a las 8:00 a.m. y los resultados se muestran en la Tabla 8. Finalmente se hace la media entre todos los tiempos que oscilan entre los 2 y los 10 minutos y se obtiene el valor medio de acceso de 5,71 minutos que se aproximará a 6 minutos. Dicha aproximación se realiza para quedar del lado de la seguridad y porque, como se ha explicado en apartados anteriores, la precisión de segundos en el análisis llevado a cabo en el que los datos son aproximaciones no tiene sentido, se procederá de igual forma con otros datos similares. También se recogen los datos de las distancias medias de acceso por barrio cuyo valor medio 2,3 km deberá incluirse en la distancia total recorrida por los usuarios.

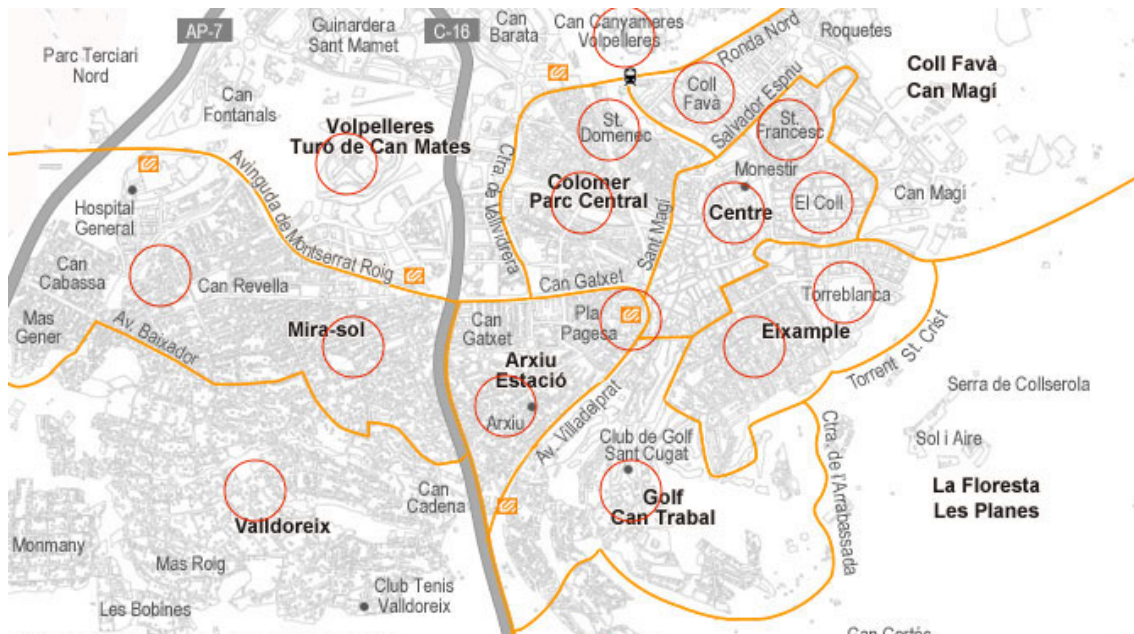


Figura 14. Barrios de Sant Cugat y sus centros. Fuente: Habitacalia.com y elaboración propia

Barrio	Tiempo medio (min)	Distancia media (km)
Volpelleres	3	1,3
Coll Favà	6	2,3
Sant Domènec	7	2,5
Parc Central	5	2,2
Sant Francesc	7	3
El Coll	9	3
Centre	9	2,5
Torreblanca	10	3,2
Eixample	9	2,6
Golf Can Trabal	7	3,5
Centre estació	3	2
Arxiu	2	1,5
Can Mates	3	1,5
Mira-Sol	3	1,5
Hospital General	6	2,5
Vallcoreix	6	3
La floresta	2	1
MEDIA	5,71	2,3

Tabla 8. Tiempos y distancias de acceso medios por barrio a la carretera Túneles de Vallvidrera. Fuente: Elaboración propia mediante datos de Google Maps.

5.3.2. Carretera convencional

Mediante el mismo procedimiento que en el caso de la carretera de peaje se calculan los tiempos y distancias recorridas para la carretera convencional tanto en condiciones normales como en hora punta teniendo en cuenta sus dos etapas. Los resultados se muestran en la Tabla 9.

	Hora valle	Hora punta	
Condiciones	Normal	Congestión	Normal
Km	13,6	5,8	7,8
min	22	35	10
h	0,37	0,58	0,17

Tabla 9. Tiempos de viaje en la carretera convencional. Fuente: Google Maps

En cuanto a los tiempo de acceso hasta la entrada a la carretera convencional de Vallvidrera desde cada uno de los barrios resultan ser los mismos que para el caso de la carretera de peaje Túneles de Vallvidrera ya que la carretera convencional se coge mediante la salida 7 de la carretera de peaje. Es decir obtenemos un valor de 5,71 minutos que igualmente se aproximará a 6 minutos y una distancia de 2,3 km.

5.3.3. Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya

Para el cálculo de los tiempos de viaje en ferrocarril tenemos que diferenciar entre tiempo de acceso a la estación, tiempo de espera y tiempo dentro del vehículo.

El tiempo de acceso se calcula igual que en el caso del acceso a las entradas de la carretera de peaje. Mediante la herramienta Google Maps se han buscado los tiempos de acceso caminando a la estación más cercana desde los centros de los barrios detallados en la Figura 14 y los resultados se muestran en la Tabla 9. Posteriormente se hace la media entre todos los tiempos de acceso y se obtiene 13,29 minutos que se aproximará a 14 minutos para quedar del lado de la seguridad.

Se ha tenido en cuenta para el cálculo del tiempo medio de acceso desde cada uno de los barrios la diferencia de las frecuencias de paso en cada una de las estaciones. Tanto en Sant Joan, Volpelleres, Hospital General y Mirasol la frecuencia de paso es la mitad respecto al resto de estaciones ya que forman parte de una de las dos ramas que se desdoblán en Sant Cugat hacia Terrassa o Sabadell. Por este motivo si los residentes de barrio tiene la opción de dirigirse hacia una de estas estaciones y hacia otra con mayor frecuencia de paso con un tiempo de acceso similar se tienen en cuenta que se dirigirán hacia la estación con mayor frecuencia de paso. De esta manera los únicos barrios que se dirigen a estaciones con una frecuencia inferior son: Volpelleres, Sant Domènec, Can Mates, Mirasol y Hospital General.

Algunos usuarios accederán a sus respectivas estaciones en coche, este tipo de comportamiento se dará en aquellos usuarios que vivan más alejados de la estación y de esta manera acortarán el tiempo de acceso que andando sería muy superior a la media. Por este motivo no se incluyen los accesos en coche, ya que aquellos usuarios que los realicen será para obtener unos tiempos de acceso cercanos a la media. Además, en caso de tener en cuenta este tipo de desplazamientos se debería tener en cuenta también los costes que supondría este acceso en coche, si es compartido, si es directamente el conductor el que posteriormente accede en tren o si una vez el usuario ha salido de casa decide directamente ir por la carretera. Dado que estos comportamientos son muy complejos no se tienen en cuenta aquí.

Barrio	Tiempo medio (min)
Vulpelleres	9
Coll Favà	19
Sant Domènec	15
Parc Central	12
Sant Francesc	20
El Coll	17
Centre	10
Torreblanca	19
Eixample	10
Golf Can Trabal	9
Centre estació	6
Arxiu	14
Can Mates	10
Mira-Sol	10
Hospital General	11
Valldoreix	23
La floresta	12
Les Planes	12
MEDIA	13,29

Tabla 10. Tiempos de acceso medios por barrio a una estación de FGC. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Google Maps.

En cuanto al tiempo de espera, se va a realizar una estimación en función de la frecuencia de paso y el comportamiento de la gente. En la Tabla 11 se muestran los horarios de paso por Sant Cugat en franjas de media hora. Se identifica claramente la hora punta desde las 7:00 hasta las 9:30 en la que el servicio de trenes se refuerza con los servicios S5 y S55. A partir de esta tabla se calculan los intervalos de paso medios en cada una de las franjas horarias, y la media total que se muestra en la Tabla 12.

























































6:30 – 7:00		7:00 – 7:30		7:30 – 8:00		8:00 – 8:30		8:30 – 9:00		9:00 – 9:30		9:30 – 10:00	
	6:33		7:02		7:31		8:01		8:30		9:01		9:34
	6:38		7:07		7:34		8:04		8:33		9:04		9:38
	6:50		7:09		7:38		8:09		8:35		9:06		9:45
	6:54		7:12		7:41		8:11		8:38		9:12		9:50
			7:14		7:43		8:14		8:41		9:14		9:57
			7:18		7:46		8:16		8:44		9:17		
			7:21		7:49		8:20		8:47		9:22		
			7:24		7:54		8:22		8:49		9:26		
			7:27		7:59		8:24		8:54		9:29		
							8:27		8:57				

Tabla 11. Horarios de Paso por Sant Cugat del Vallès. Fuente: FGC.

Intervalos de paso						
6:30 – 7:00	7:00 – 7:30	7:30 – 8:00	8:00 – 8:30	8:30 – 9:00	9:00 – 9:30	9:30 – 10:00
7 min	3 min	3 min	2 min	3 min	3 min	5 min
Media en hora punta: 3 minutos						

Tabla 12. Intervalos de paso en Sant Cugat del Vallès. Fuente: Elaboración propia.

Mediante el análisis realizado se deduce que el tiempo medio de espera son 1:30 minutos ya que el usuario más perjudicado esperará 3 minutos y el menos perjudicado cogerá el tren nada más llegar a la estación. Se toma este valor para todas las estaciones aunque en 4 de ellas: Hospital General, Mira-Sol, Sant Joan y Vulpelleres el intervalo de paso es superior. Escoger el mismo intervalo para

todos los casos se justifica porque tan solo 5 de los 17 barrios analizados acceden mediante estas estaciones y además la mayoría de usuarios que realizan los viajes que analizamos en hora punta mediante Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya hacen el mismo viaje diariamente, esto significa que la gente tiende a coger siempre el mismo tren y sale de casa previendo la hora a la que sale “su” tren. Por lo tanto el tiempo de espera no suele ser superior a los 3 minutos que se obtienen en el análisis.

5.4. *Costes de operación del vehículo privado*

Los costes de operación del vehículo son los costes asumidos por los usuarios del vehículo privado debidos al uso del mismo; incluyen consumo de carburantes, consumo de lubricantes, deterioro de ruedas, costes de reparación y mantenimiento y amortización. Estos costes dependen del tipo de vehículo, velocidad de viaje y características geométricas de las carreteras debido a los estándares de diseño y las condiciones de rodadura.

Puesto que las recomendaciones son utilizar valores estandarizados de dichos costes de la región en que se estudia el problema se utilizarán los valores propuestos por el Manual del Sistema d’Avaluació d’Inversions en Transport (SAIT) de 2015, del Departament de Territori i Sostenibilitat para las evaluaciones socioeconómicas realizadas sobre las principales actuaciones viarias y ferroviarias impulsadas por la Direcció General d’Infraestructures de Mobilitat Terrestre.

En la Tabla 13 se muestran los datos proporcionados y se comprueba que son datos medios de Catalunya. Según la información, y con un valor medio entre gasolina y diésel de 1,2€/l actuales, el gasto a los 100 km de media para el parque de vehículos turismo de Catalunya es de 6,16€/100 km. Valor considerado normal ya que vehículos antiguos gastarán más de este valor y los más nuevos del mercado menos. En cuanto a la amortización, se estima que la vida media de un vehículo son 150.000km de manera que el precio medio serían 20.000.

		Valor	Unidades
C	Carburantes	0,074	€/km
L	Lubricantes	0,004	€/km
N	Neumáticos	0,011	€/km
M	Mantenimiento	0,047	€/km
A	Amortización	0,135	€/km

Tabla 13. Valor de los costes de operación por km. Fuente: SAIT 2015

Puede observarse que los datos proporcionados no están expresados en función de la velocidad, de los tipos de vehículo o de las características geométricas de la carretera. Dado que no se disponen de estos datos desglosados se utilizarán los valores medios, sin embargo se introduce el efecto de la congestión ya que para el caso que estudiamos es el factor que más afecta e incrementa los consumos.

Dado que no existen datos oficiales acerca de la diferencia de consumo entre la conducción en condiciones con y sin congestión, se ha determinado que el consumo de combustible es aproximadamente el doble. Este dato se ha extraído de observaciones propias al realizar la ruta en las diferentes condiciones.

Por este motivo, para las dos carreteras, se multiplicará el valor del combustible de la Tabla 13 por los kilómetros que se realizan en condiciones normales calculados anteriormente y mostrados en la Tabla 14, y se multiplicará el doble del valor del combustible de la Tabla 13 por los kilómetros que se realizan en condiciones congestionadas, también calculados anteriormente y mostrados en la

Tabla 14. El cálculo de los costes de operación del vehículo privado se muestra a continuación así como los valores obtenidos para cada uno de los tipos de carretera.

$$O = km_t[L + N + M + A] + km_c \cdot 2C + [km_a + km_n] \cdot C$$

		Carretera de Peaje	Carretera Convencional
km_t	Km totales	12,3	15,9
km_a	Km acceso	2,3	2,3
km_c	Km en congestión	5,3	5,8
km_n	Kilómetros normal	4,7	7,8
Costes por trayecto		3,73€	4,74€

Tabla 14. Costes de Operación del vehículo privado. Fuente: Elaboración propia.

5.5. Tasas

La tasa del peaje de la carretera Túneles de Vallvidrera es conocida, 4,18€ en hora punta y 3,72€ en hora valle, ambos precios para turistas. En el caso que aquí se estudia se utilizará la tasa para la hora punta que se aplica de 7:30 a 10:30 y de 17:00 a 21:00.

En cuanto a la tasa directa que pagan los usuarios del ferrocarril se ha determinado en 1,80€, no es un valor directo como el del peaje sino que se han tenido que hacer diversos cálculos y varias consideraciones que se exponen a continuación.

Existen una gran diversidad de billetes de tren diferentes que FGC tiene agrupados según las siguientes categorías: Billeto sencillo, Billetes con descuento, Tarjeta T-10, tarjeta T-50/30, Tarjeta T-MES, otras ATM, T-Trimestre i T-jovem, Tarjeta FnFm 70/90, Tarjeta pensionista, T-Familia numerosa, Tarjeta T-12, Abonos anuales, Abonos trimestrales, Pases de pensionista y otros pases.

No toda la población cumple los requisitos para acceder a la compra de cualquiera de los títulos enumerados y por consiguiente el porcentaje de usuarios que utiliza unos u otros es diferente. Para el cálculo del precio a utilizar en este trabajo se ha hecho la media ponderada entre los billetes más utilizados y no se han tenido en cuenta los descuentos por varios motivos. No se dispone del valor exacto de todos los descuentos disponibles, además, excluyendo los descuentos se tiene un precio máximo de referencia que cualquier usuario que actualmente utiliza el coche deberá pagar al viajar en tren. También se tiene en cuenta que esta simplificación no distorsiona el precio ya que en caso de incorporar el resto de billetes con descuentos la variación es únicamente del orden de céntimos.

Los billetes sin descuentos y que suponen el 87% de las validaciones en la estación de referencia Sant Cugat del vallés durante todo el año 2016 se muestran en la Tabla 15. Para el cálculo unitario de los precios por viaje se ha considerado que un mes tiene 20 días laborables y se realizan viajes de ida y vuelta ya que los motivos de desplazamiento de la demanda aquí analizada son únicamente por trabajo y estudios. El porcentaje de uso de la T-trimestre y la T-Joven no está disponible por separado así que se ha considerado el precio medio entre las dos. Los precios utilizados son todos los correspondientes a los títulos de 2 zonas ya que toda la demanda analizada viaja desde el municipio de Sant Cugat del Vallès hasta Barcelona.

El precio final se ha calculado haciendo la media ponderada del precio del viaje unitario en función del porcentaje de uso del mismo. El billete sencillo se ha descartado a la hora de calcular el precio final ya que estamos hablando de una demanda que realiza este mismo viaje a diario, lo que significa que utilizará algún tipo de billete integrado.

	Billete sencillo	Tarjeta T-10	T-MES	T-Trimestre y Joven
Duración	1 viaje	10 viajes	1 mes	3 meses
% de uso	6%	46%	18%	17%
Precio por viaje	3€	1,96€	1,78€	1,39€
Precio medio del viaje de tren: 1,80€				

Tabla 15. Tarifas de los billetes de FGC.

5.6. Resumen

La Tabla 16 resume todos los datos que se han extraído en este capítulo y que finalmente se introducirán en el modelo. En el caso de los usuarios del vehículo privado se ha tenido en cuenta que los costes de la tasa de peaje y los costes de operación serán soportados por todos los ocupantes del coche.

Según la Enquesta de Mobilitat en Dia Feiner de 2015 (EMEF 2015), la ocupación media del vehículo privado es de 1,6 para el conjunto del Sistema Tarifario Integrado (STI). Los datos desglosados por comarcas indican que la ocupación es de 1,7 personas por vehículo tanto en el Vallès Occidental como en el Barcelonès, comarcas entre las cuales se producen los desplazamientos analizados, por este motivo el valor escogido para obtener la demanda que viaje en coche es 1,7 pasajeros por vehículo. Por este motivo los costes anteriormente mencionados se dividirán entre 1,7.

DATO		VALOR	UNIDADES
VdT	Valor del Tiempo	9,22	€/h
Carretera de Peaje			
T_p	Tasa del peaje	2,46	€
O	Costes de Operación	2,19	€
t_{ap}	Tiempo de viaje de acceso	6	min
t_{cp}	Tiempo de viaje en congestión	25	min
t_{np}	Tiempo de viaje condiciones normales	16	min
a₃	Factor de ponderación congestión	1,5	-
Carretera convencional			
O	Costes de Operación	2,79	€
t_{ac}	Tiempo de viaje de acceso	6	min
t_{cc}	Tiempo de viaje en congestión	35	min
t_{np}	Tiempo de viaje condiciones normales	16	min
a₃	Factor de ponderación congestión	1,5	-
Ferrocarril			
T_f	Tasa del ferrocarril	1,80	€
t_a	Tiempo de acceso	14	min
t_e	Tiempo de espera	1,5	min
t	Tiempo de viaje	14	min
a₂	Factor de ponderación andando	2	-
a₁	Factor de ponderación espera	2,5	-
a₄	Factor de ponderación vehículo concurrido	1,5	-

Tabla 16. Factores a introducir en el modelo. Fuente: Elaboración propia.

Carretera de peaje:

$$CG_p = T_p + O + VdT(t_{ap} + a_3 \cdot t_{cp} + t_{np})$$

Donde:

T_p : Tasa del peaje.

O : Costes de operación del vehículo.

VdT : Valor del Tiempo.

t_{ap} : Tiempo de viaje de acceso.

a_3 : Factor de ponderación del valor del tiempo de congestión.

t_{cp} : Tiempo de viaje en congestión.

t_{np} : Tiempo de viaje sin congestión.

Carretera convencional:

$$CG_c = O + VdT(t_{ac} + a_3 \cdot t_{cc} + t_{nc})$$

Donde:

O : Costes de operación del vehículo.

VdT : Valor del Tiempo.

t_{ac} : Tiempo de viaje de acceso.

a_3 : Factor de ponderación del valor del tiempo de congestión.

t_{cc} : Tiempo de viaje en congestión.

t' : Tiempo de viaje sin congestión.

Ferrocarril:

$$CG_f = T_f + VdT(a_2 \cdot t_a + a_1 \cdot t_e + a_4 \cdot t)$$

Donde:

T_f : Tasa del billete de tren.

VdT : Valor del Tiempo.

a_2 : Factor de ponderación del valor del tiempo andando.

t_a : Tiempo de acceso a la estación.

a_1 : Factor de ponderación del valor del tiempo de espera.

t_e : Tiempo de viaje en espera

a_4 : Factor de ponderación del valor del tiempo en vehículos concurridos.

t : Tiempo de viaje.

6. PRUEBA Y CALIBRACIÓN DEL MODELO

Una vez obtenidos todos los datos necesarios para utilizar el modelo de previsión de demanda escogido, se procede en este apartado a analizar los resultados que éste nos proporciona.

El proceso seguido ha sido determinar los datos iniciales que proporciona el modelo que posteriormente se compararán con los datos reales de las demandas de cada una de las alternativas. A partir de aquí surgirá la necesidad de analizar la influencia de cada una de las variables para finalmente ser capaces de proponer una calibración que se corresponda con la realidad. Por último se detectarán los puntos débiles y las futuras necesidades del corredor.

6.1. Resultados del modelo teórico

Se calculan los Costes Generalizados de cada una de las alternativas de viaje mediante los datos que se presentan en el apartado anterior, en la Tabla 17 se muestran los resultados que finalmente se introducirán en el modelo.

Alternativa	Costes Generalizados	
Carretera de Peaje	CG_p	12,87 €
Carretera convencional	CG_c	13,31 €
Ferrocarril	CG_f	9,91 €

Tabla 17. Costes Generalizados. Fuente: Elaboración propia.

Se complementa la información con el gráfico de la Figura 15 donde se desglosan los costes. Se observa que el precio que finalmente paga un usuario de cualquiera de las dos opciones de carretera es muy similar, este hecho suele ser desconocido por los usuarios ya que mientras que en la carretera de peaje se desembolsa directamente parte de este precio mediante el peaje, en la carretera convencional se paga indirectamente en tiempo de viaje y operación del vehículo.

El coste de viajar por la carretera convencional es ligeramente superior, sin embargo puede observarse que el precio del peaje es equivalente al coste del incremento de tiempo que supone viajar por la carretera convencional, de manera que la principal diferencia de costes entre las dos carreteras son los costes de operación. Aunque si sumamos atributos no cuantificables de la carretera convencional como la incomodidad de la conducción en curvas, o la poca seguridad de esta carretera, los costes soportados por los usuarios serían aún mayores respecto a la carretera de los Túneles de Vallvidrera.

El coste que un usuario de ferrocarril soporta finalmente es alrededor de un 25% inferior al de un usuario de cualquiera de las dos carreteras, debido principalmente al ahorro en la operación del

vehículo, aunque el precio de la tarifa y el tiempo de viaje son competitivos respecto a las alternativas de las carreteras.

Otro dato destacable es la igualdad entre los costes del tiempo de viaje mediante la carretera Túnel de Vallvidrera y mediante Ferrocarril. Este hecho demuestra la competitividad de la alternativa ferrocarril, ya que normalmente las alternativas de transporte público incrementan notablemente sus costes debido al tiempo de viaje.

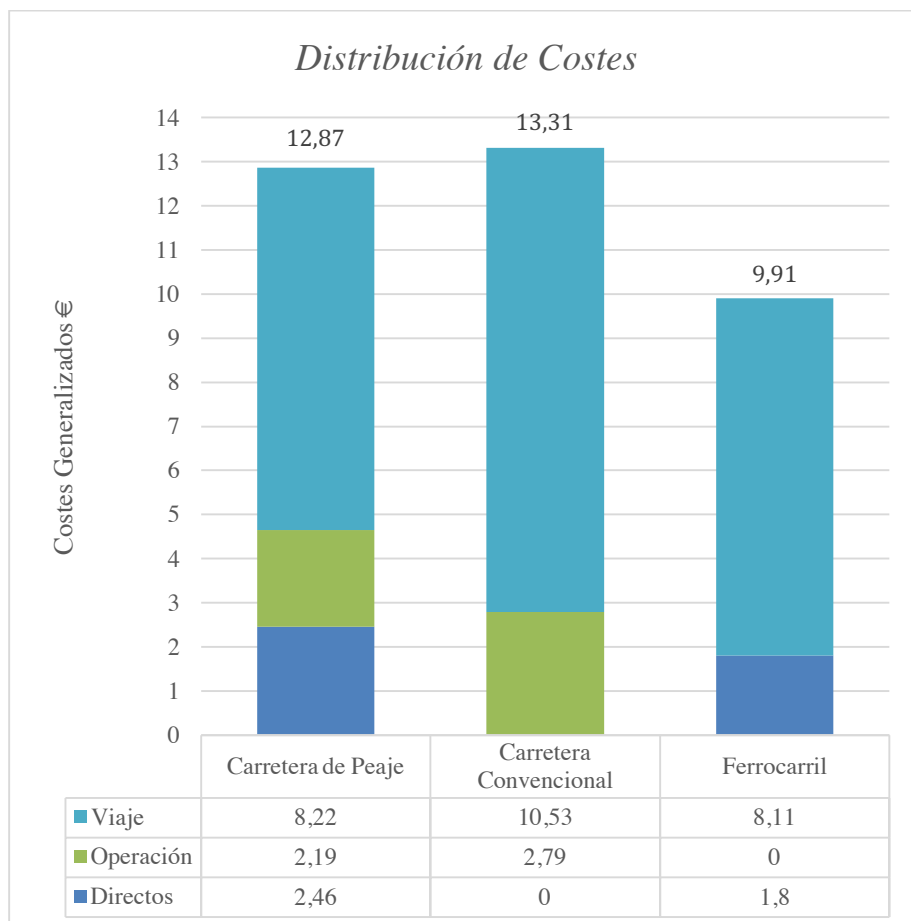


Figura 15. Distribución de los Costes Generalizados. Fuente: Elaboración propia.

Mediante el modelo Logit Multinomial se estiman las probabilidades de elección de cada uno de los modos de transporte a partir de los Costes Generalizados correspondientes. En la Tabla 18 se muestran los resultados obtenidos. Como era de esperar, el modelo predice que la demanda del ferrocarril debería ser muy superior a la de las carreteras, concretamente el 92% de los usuarios que se encuentren ante la disyuntiva de utilizar alguna de las tres alternativas deberían escoger el ferrocarril.

Carretera de Peaje	Carretera Convencional	Ferrocarril
$P_p = \frac{\exp(CG_p)}{\exp(CG_p) + \exp(CG_c) + \exp(CG_f)}$	$P_c = \frac{\exp(CG_c)}{\exp(CG_p) + \exp(CG_c) + \exp(CG_f)}$	$P_f = \frac{\exp(CG_f)}{\exp(CG_p) + \exp(CG_c) + \exp(CG_f)}$
$P_p = 0,048$	$P_p = 0,031$	$P_p = 0,922$

Tabla 18. Resultados del modelo teórico. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos llevan a plantear varias consideraciones que deben ser analizadas para conocer el comportamiento de la demanda de este corredor. Tal y como se ha planteado el problema, en todo momento se analizan los Costes Generalizados en situación de congestión, de aquí surge un punto interesante a ser analizado, ¿Qué valores predice el modelo en situación sin congestión?. La cantidad de demanda que actualmente utiliza cada una de las alternativas influye en el coste que los usuarios pagan, si la demanda de las carreteras fuese inferior a la actual los parámetros incluidos en los cálculos que hacen referencia a la congestión serían inferiores y harían disminuir los Costes Generalizados de las carreteras. Lo mismo ocurre en el caso del ferrocarril, si la demanda fuese inferior el parámetro de la comodidad sería diferente y también haría disminuir los costes.

Por otro lado, los Costes Generalizados aquí calculados hacen referencia a la situación actual pero, ¿Cuál es esta situación actual?. Conociendo las demandas reales podemos comparar los resultados obtenidos mediante el modelo con la realidad e intentar calibrar sus variables para hacerlo lo más verosímil posible.

Una manera de realizar esta calibración es analizando la influencia de las variables en el método teórico y conocer cómo influyen en los Costes Generalizados cada una de ellas, éste será el siguiente punto a ser estudiado. Para este análisis se detallan las características poblacionales de la demanda que se encuentra ante la disyuntiva de escoger una de las tres alternativas escogidas. Y también se indaga en la existencia de un parámetro de penalización en el ferrocarril que sea capaz de aproximar el modelo a la realidad, basándonos en que los resultados actuales muestran una penalización para el ferrocarril no cuantificada.

Por último, se debe tener en cuenta que nos encontramos ante un corredor con capacidad limitada, se debe analizar si la situación sin congestión en las carreteras, donde la demanda es traspasada al ferrocarril, es técnicamente posible. A esta consideración debe añadirse el hecho del aumento de la demanda observada durante los últimos años y la previsión de prohibiciones de entrada a Barcelona para los coches.

6.2. Resultados del modelo teórico sin congestión

Los Costes Generalizados que se han calculado en este trabajo hasta este punto tienen en cuenta los sobrecostes producidos por la congestión, que finalmente son soportados por todos los usuarios. Se decide realizar de nuevo el ejercicio de cálculo de los Costes Generalizados de cada una de las tres alternativas en caso de que éstas no estuviesen congestionadas, para posteriormente aplicar de nuevo el modelo Logit Multinomial.

En los costes de operación del vehículo se ha tenido en cuenta que el consumo de combustible en condiciones de congestión es muy superior al consumo en condiciones normales, en este caso se utilizará el consumo de combustible normal para todo el recorrido.

En cuanto al tiempo de viaje de las carreteras también se ha tenido en cuenta que el valor del tiempo perdido en condiciones congestionadas es superior al valor del tiempo en circulación libre, igual que en caso anterior se aplicará únicamente el valor del tiempo normal para todo el recorrido.

Para el caso del ferrocarril, la influencia de la congestión viene dada mediante el factor de ponderación del valor del tiempo de viaje pasado en vehículos muy concurridos, en este no se aplica dicho factor. Finalmente en la Tabla 19 se muestran los nuevos valores a introducir en el modelo en comparación con los factores para el caso con congestión.

DATO		CONGESTIÓN	NORMAL	UNIDADES
VdT	Valor del Tiempo	9,22	9,22	€/h
Carretera de Peaje				
T_p	Tasa del peaje	2,46	2,46	€
O	Costes de Operación	2,19	1,96	€
t_{ap}	Tiempo de viaje de acceso	6	6	min
t_{cp}	Tiempo de viaje en congestión	25	-	min
t_{np}	Tiempo de viaje condiciones normales	16	9	min
a_3	Factor de ponderación congestión	1,5	-	-
Carretera convencional				
O	Costes de Operación	2,79	2,53	€
t_{ac}	Tiempo de viaje de acceso	6	6	min
t_{cc}	Tiempo de viaje en congestión	35	0	min
t_{np}	Tiempo de viaje condiciones normales	16	22	min
a_3	Factor de ponderación congestión	1,5	-	-
Ferrocarril				
T_f	Tasa del ferrocarril	1,80	1,80	€
t_a	Tiempo de acceso	14	14	min
t_e	Tiempo de espera	1,5	1,5	min
t	Tiempo de viaje	14	14	min
a_2	Factor de ponderación andando	2	2	-
a_1	Factor de ponderación espera	2,5	2,5	-
a_4	Factor de ponderación vehículo concurrido	1,5	1	-

Tabla 19. Factores para el caso de congestión y sin ella. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 16 puede observarse la comparativa entre los Costes Generalizados obtenidos con y sin congestión. Puede apreciarse que el efecto de la congestión en las carreteras es muy superior que en el ferrocarril principalmente debido al incremento del tiempo de viaje que produce la congestión en las carreteras.

En el caso de los Costes Generalizados sin congestión los valores de las carreteras son un 30% inferior a los costes del ferrocarril. Y se observa que los costes de viajar por cualquiera de las dos carreteras son prácticamente iguales, de esta manera se constata que el precio del peaje es equiparable al aumento de los costes de operación del vehículo y al aumento del tiempo que sufre un usuario que viaja por la carretera convencional.

En cuanto a las demandas que proporciona el modelo en este caso, se observa en la la Figura 17 que únicamente el 6% de la demanda escogería la alternativa ferrocarril.

No se debe caer en el error en pensar que estos datos corresponderían a la distribución de la demanda en hora valle, ya que los valores de las variables incluidas para el cálculo de los Costes Generalizados serían diferentes como por ejemplo el valor del tiempo o los tiempos de acceso.

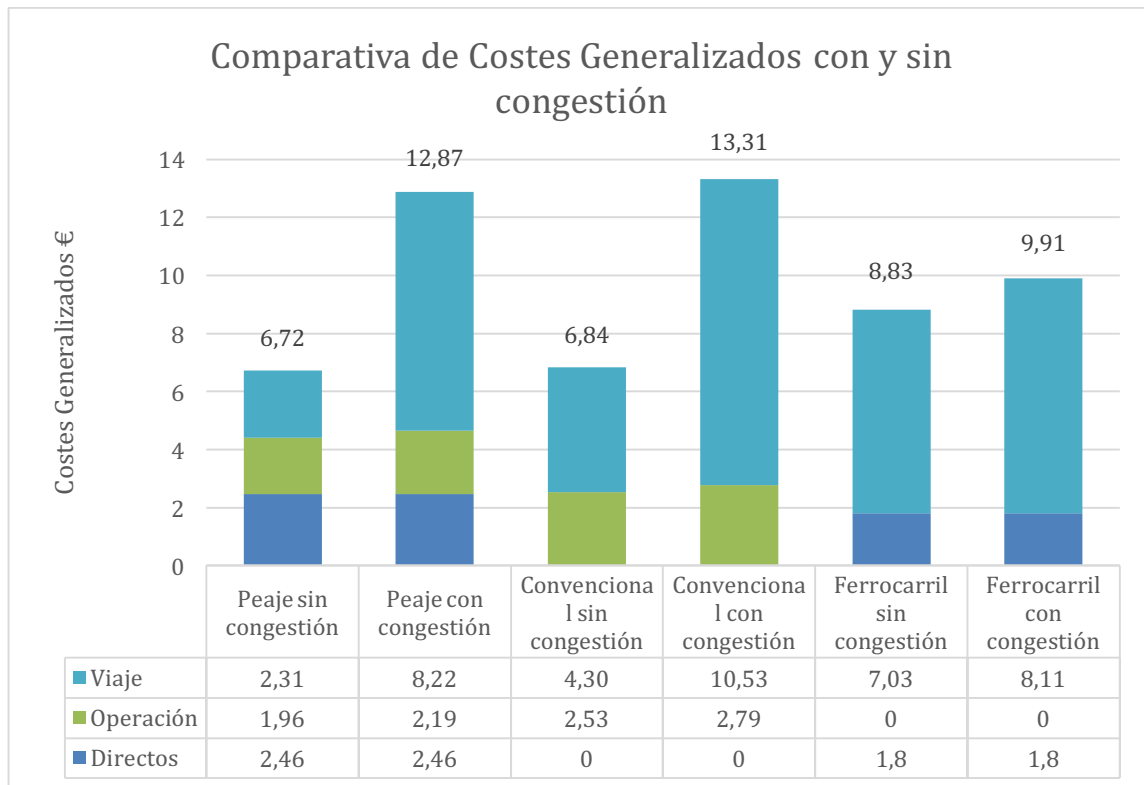


Figura 16. Comparativa de Costes Generalizados con y sin congestión. Fuente: Elaboración propia.

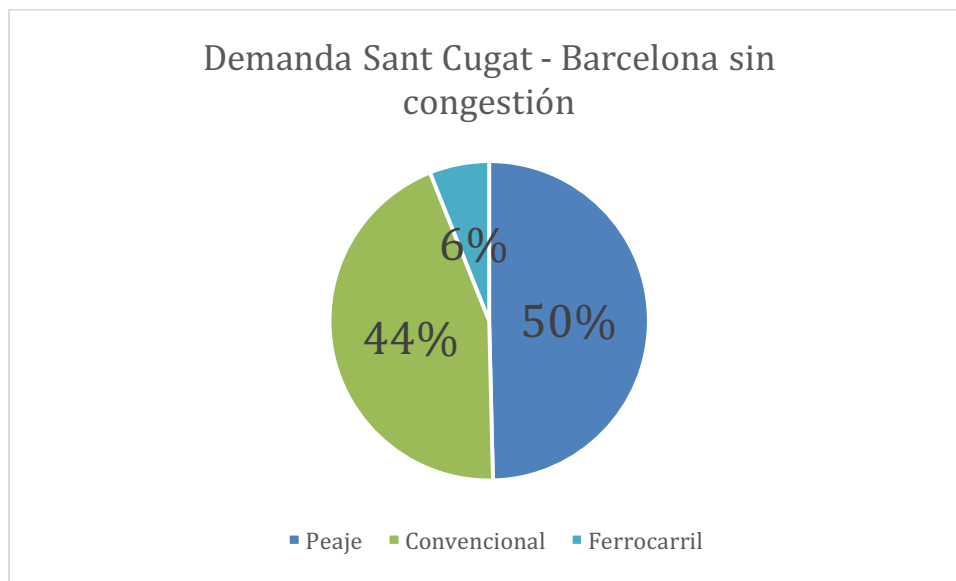


Figura 17. Reparto de demandas según el modelo en el caso sin congestión. Fuente: Elaboración propia.

6.3. Datos reales

Para obtener los datos reales se deben hacer unas consideraciones, la demanda que aquí se analiza es aquella que se encuentra ante la disyuntiva de escoger entre cada una de las tres alternativas, es decir, aquella con origen término municipal Sant Cugat del Vallès. En este sentido debe tenerse en cuenta que no toda la demanda que viaja en tren se encuentra ante esta situación ya que no siempre existe la disponibilidad de coche propio.

6.3.1. *Demanda de las carreteras*

Los datos de la demanda de la carretera de Peaje se han obtenido de la empresa Túneles de Barcelona i Cadí, Concessionària de la Generalitat de Catalunya, SA. Se han proporcionado datos de diferentes puntos de aforo entre las 7 y las 10 de la mañana de cuatro lunes del mes de mayo de 2017, concretamente los días 8, 15, 22 y 29. Se utilizan estos datos ya que son representativos de días laborables con congestión. En la siguiente imagen se muestran los puntos de aforo de donde se proporcionan datos y las entradas que hacen referencia al término municipal de Sant Cugat.

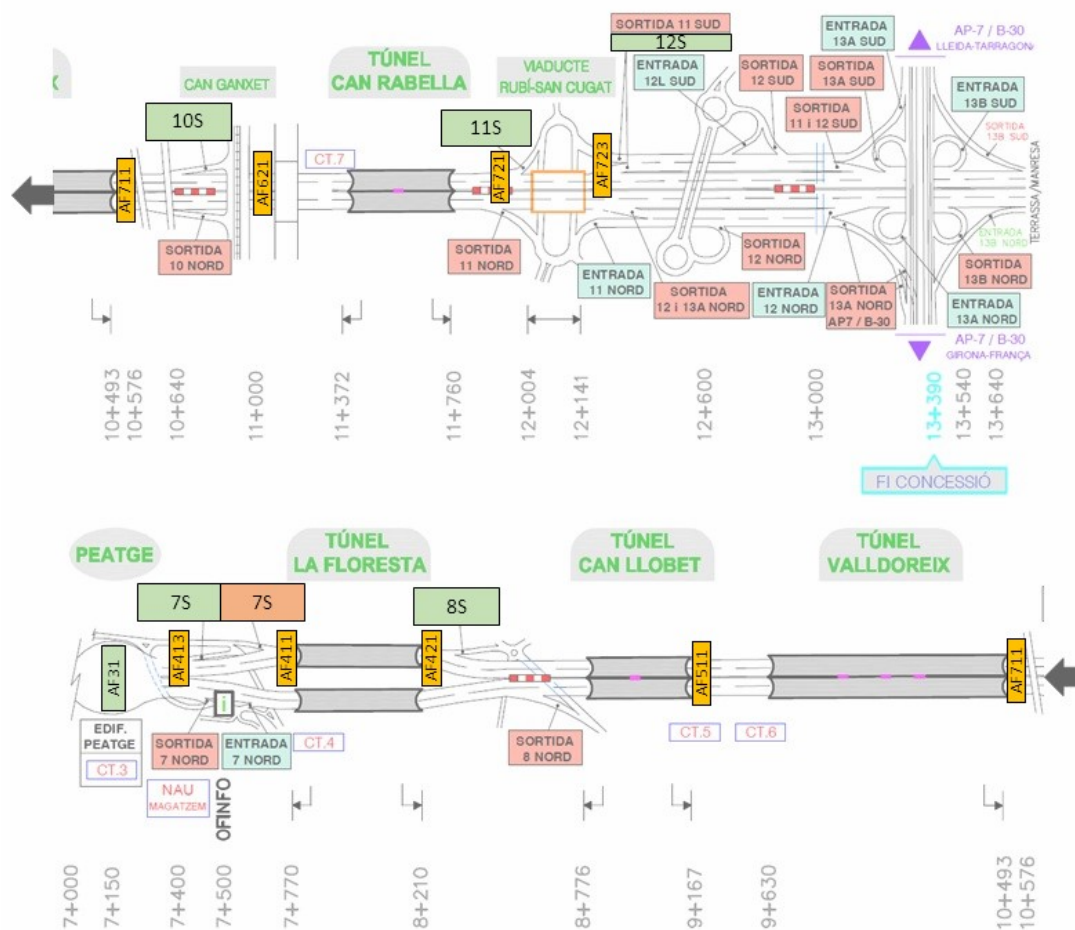


Figura 18. Plano con entradas y salidas de la carretera Túneles de Vallvidrera. Fuente: Elaboración propia y Túneles de Barcelona i Cadí, Concessionària de la Generalitat de Catalunya, SA.

Dado que no se tienen monitorizadas todas las entradas, se obtienen los datos de algunas de ellas mediante la resta de los aforos situados en una sección anterior y otra posterior a la entrada deseada. De esta manera se tiene conocimiento del número de vehículos con origen término municipal de Sant Cugat y que se dirigen a Barcelona. Estos datos corresponden a las entradas 12S, 11S, 10S, 8S y 7S, detallados en la Tabla 20 para cada uno de los cuatro lunes analizados.

	Entradas					Total Entrada	Salida 7S	Total circulan
	12S	11S	10S	8S	7S			
	AF723	AF721	AF711-AF621	AF511-AF421	AF413		AF411-AF31	AF411
08/05/17	639	9307	1257	914	91	3939	1731	9307
15/05/17	654	9454	1156	1280	100	4307	1830	9454
22/05/17	597	9272	1267	1366	99	4356	1760	9272
29/05/17	682	9511	1193	1025	100	4057	1878	9511
Promedio	643	9386	1218	1146	98	4165	1800	9386

Tabla 20. Número de vehículos en entradas y salidas. Fuente: Elaboración propia y Túneles de Barcelona i Cadí, Concessionària de la Generalitat de Catalunya, SA.

Por otro lado se debe encontrar la cantidad de vehículos que cogen la salida 7S, es decir que se desvían hacia la carretera convencional de Vallvidrera. Para ello se utilizan los datos del aforo del peaje, mediante los cuales se obtienen el número de vehículos que pasan por el mismo. Restando este valor al número de vehículos que indica el último aforo situado entre la salida hacia la carretera convencional y la última entrada a la carretera de peaje, se obtiene, del total de vehículos que circulan por los túneles de Vallvidrera los vehículos que se desvían hacia la carretera convencional. En la Tabla 20 se muestra el promedio del valor de los cuatro días analizados resaltado en verde.

Sin embargo no todos los coches que se desvían tienen como origen el término municipal del Sant Cugat del Vallès, por este motivo lo que se busca es el porcentaje de vehículos desviados, cuyo resultado es un 19% de media entre los cuatro días analizados. Este porcentaje se aplicará a la cantidad de vehículos con origen término municipal de Sant Cugat del Vallès cuyo valor promedio está resaltado en naranja en la Tabla 20, y se obtendrá el número de vehículos que se desviarán por la carretera convencional. Al realizar este cálculo se está asumiendo que el porcentaje de vehículos que se desvían por la carretera convencional será el mismo independientemente de su origen, esta premisa no se sabe si es cierta o podrían existir variaciones en función del tiempo de viaje total, dado que no se dispone de más información se asumirá como hipótesis válida.

Finalmente con el tratamiento de datos realizado podemos obtener, del total de la demanda que viaja por los Túneles de Vallvidrera cuyo valor promedio está resaltado en azul en la Tabla 20, la cantidad de vehículos que pasan por el peaje tanto con origen término municipal del Vallès como provenientes de otros destinos. Y también se obtiene el número de vehículos que deciden desviarse hacia la carretera convencional de Vallvidrera provenientes de los dos distintos orígenes.

Hasta este punto se ha hablado de vehículos, este dato debe trasladarse a demanda para posteriormente poder compararse con los datos del ferrocarril. Como se ha visto en apartados anteriores la ocupación por vehículo es de 1,7 personas, de manera que en el gráfico de la Figura 19 se resumen los datos obtenidos en cuanto a demanda de las carreteras, tanto en vehículos como en personas.

La demanda que circula por los túneles de vallvidrera con origen el término municipal de Sant Cugat es del 44,4% frente a otros orígenes dispersos como pueden ser Sabadell, Terrassa o Manresa. El 19,2% de la demanda que circula por el tramo de la carretera de peaje Túneles de Vallvidrera decide evitar el peaje y llegar a Barcelona por la carretera convencional.

Las demandas finales en hora punta de la carretera de peaje y de la carretera convencional para un día laborable normal son respectivamente 5.722 personas y 1.358 personas entre las 7 y las 10 de la mañana. En la Figura 19 se representan los datos para las dos carreteras.

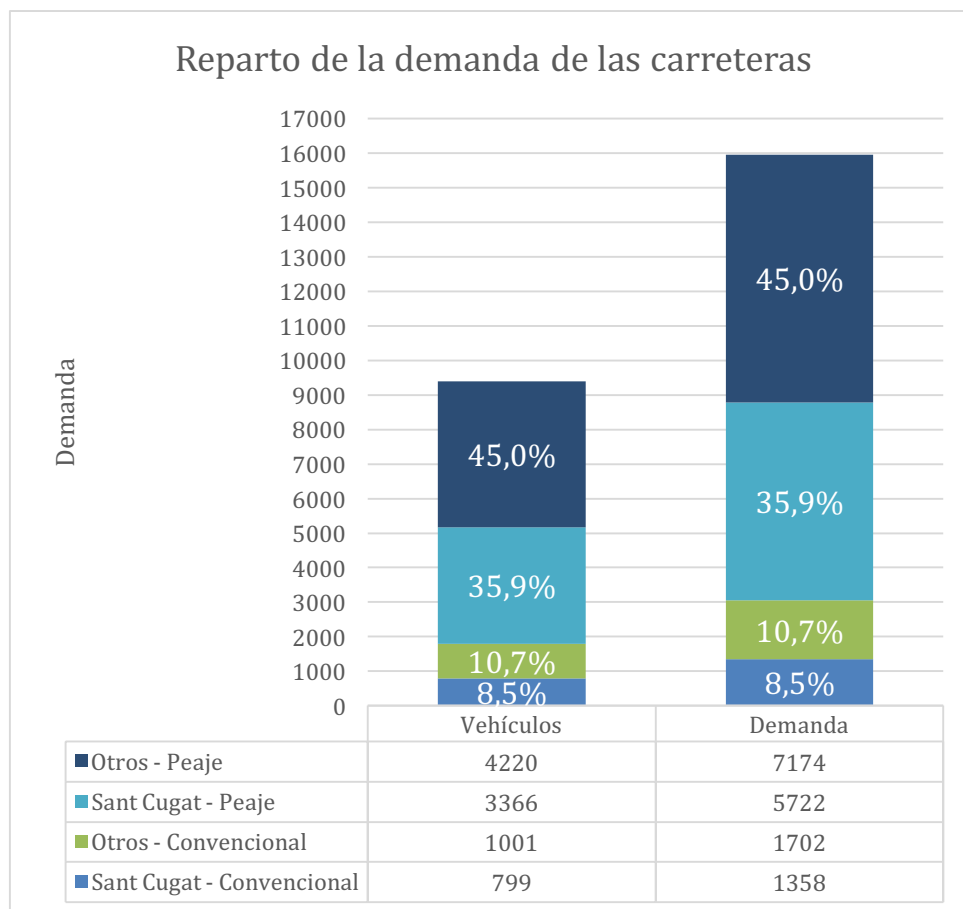


Figura 19. Resumen de los datos de vehículos y demandas de las carreteras. Fuente: Elaboración propia.

6.3.2. Demanda del ferrocarril

Los datos de la demanda del ferrocarril se han obtenido de Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya. En cada una de las estaciones se tienen registros del número de validaciones de billetes que se producen a través de las barreras tarifarias y a la hora que se producen los mismos. Estos datos proporcionan el número de usuarios que utilizan el ferrocarril tanto en sentido ascendente como descendente en la línea, los datos que se necesitan para continuar con el análisis de este trabajo corresponden únicamente a la demanda que viaja en sentido Barcelona.

Por este motivo se han utilizado las estadísticas disponibles en la documentación interna de FGC de la proporción típica de viajeros que en cada estación se dirige hacia Barcelona en hora punta, estos datos corresponden a aproximaciones no son datos exactos. Se aplican los valores de dicha proporción a los valores absolutos y de esta manera se eliminan los usuarios que van en sentido contrario o que utilizan el ferrocarril para desplazarse entre estaciones intermedias.

El gráfico de la Figura 20 resume los datos por estaciones especificados por horas, los valores detallados en el gráfico corresponden al conjunto de las tres horas. En cada estación se muestra la cifra total de pasajeros aportada. Puede observarse que de las 9:00 a las 10:00 la demanda es inferior ya que como se ha visto en apartados anteriores de 9:30 a 10:00 ya no se considera hora punta, sin embargo los datos disponibles son por hora.

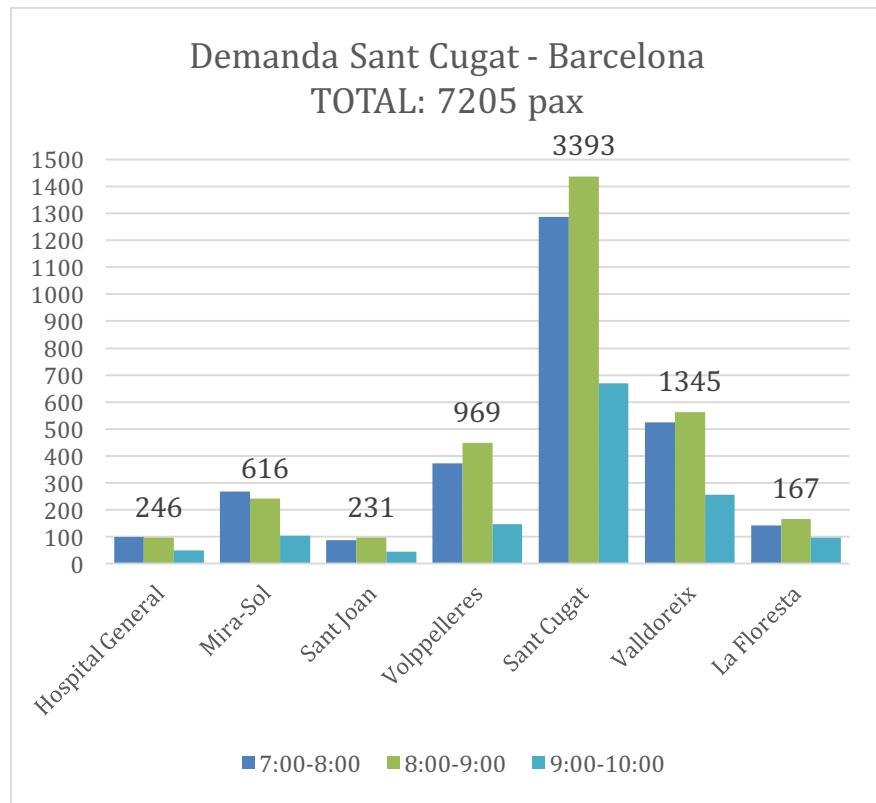


Figura 20. Demanda por estaciones y por hora en hora punta. Fuente: Elaboración propia y FGC.

Se considera interesante mostrar también la demanda proveniente del resto de estaciones situadas aguas arriba del municipio de Sant cugat del Vallès que viajan en dirección Barcelona en hora punta. Los datos se resumen en la Figura 21, los valores detallados en el gráfico corresponden al conjunto de las tres horas

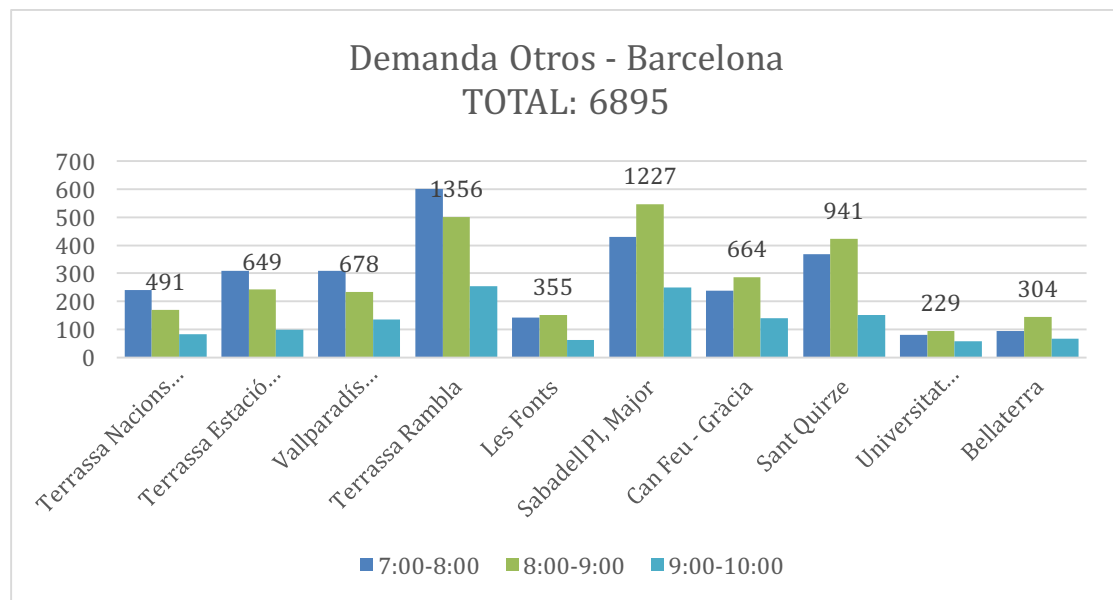


Figura 21. Demanda con origen Otras estaciones y destino Barcelona. Fuente: Elaboración propia y FGC.

Igual que se ha realizado para el caso de las carreteras, resulta interesante saber el porcentaje de la demanda que viaja con destino Barcelona que aporta el término municipal de Sant Cugat del Vallès en relación al total de la demanda que viaja en sentido Barcelona, la proporción se representa en la Figura 22, y resulta ser de un 51,1%.

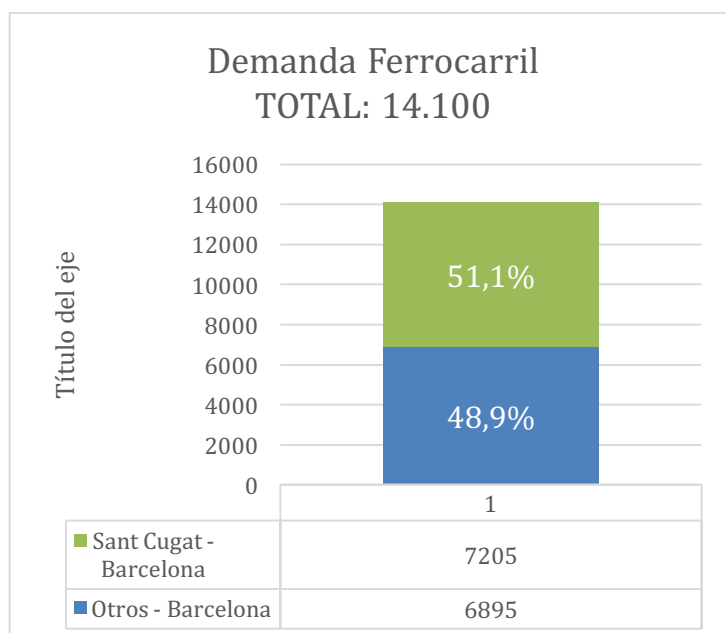


Figura 22. Proporción de demanda del Ferrocarril según origen. Fuente: Elaboración propia.

6.3.3. Demandas finales

Finalmente se detalla en este apartado la proporción de demanda que circula por cada una de las tres alternativas. En cuanto a la demanda del ferrocarril se debe incluir únicamente aquella que se encuentra ante la disyuntiva real de escoger entre cada una de las tres alternativas, es decir, se tiene en cuenta que no todos los usuarios del ferrocarril tienen la opción de ir en coche al no disponer de vehículo propio o no tener la disponibilidad de compartirlo. A continuación se realiza una estimación de la proporción que representa esta demanda.

Según el Institut d'Estadística de Catalunya (IDESCAT) la población del término Municipal de Sant Cugat del Vallès es de 87.830 personas y el parque de turismos es de 37.612 vehículos, datos del año 2015. De esta manera el índice de motorización del municipio Sant Cugat del Vallès es el siguiente.

$$I_m = \frac{37.612 \text{ turismos}}{87.830 \text{ personas}} \cdot 100 = 42,82\%$$

Mediante este índice de motorización sabemos la proporción de demanda que dispone de vehículo, sin embargo como sabemos que la ocupación media por vehículo es de 1,7 pasajeros se deduce que la demanda que tiene acceso a viajar en vehículo privado es:

$$42,82\% \cdot 1,7 = 72,79\%$$

Es decir el 72,79% de la demanda que viaja en Ferrocarril podría encontrarse ante la disyuntiva de viajar en Ferrocarril o mediante el vehículo privado por cualquiera de las dos carreteras, el resultado final son 5245 pasajeros. No debemos olvidar que esto es una estimación ya que podría darse que mayor proporción de la demanda que dispone de vehículo privado viaje por las carreteras o que la ocupación del 1,7 venga influenciada por otros factores como cantidad de miembros de la familia que realizan el mismo viaje, sin embargo estos datos no se conocen.

Finalmente la relación de la demanda real que decide viajar por cada una de las alternativas se resume en el gráfico de la Figura 23. Entre el ferrocarril y la carretera de peaje se reparten la mayor cantidad de demanda a partes iguales, la carretera convencional es escogida por una fracción de

demanda inferior. Son precisamente los porcentajes de este gráfico los que debería proporcionar el modelo Logit Multinomial escogido.

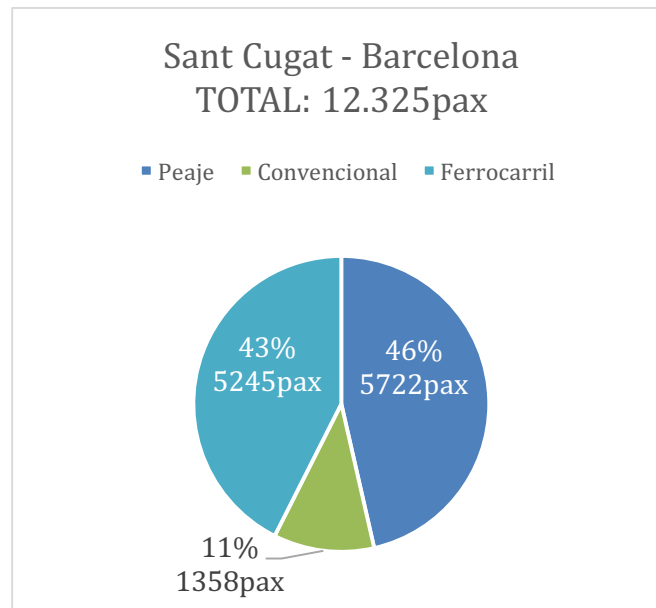


Figura 23. Relación de demandas ante la disyuntiva de elección en cada una de las tres alternativas. Fuente: Elaboración propia.

6.4. Influencia de las variables

6.4.1. Características de la población

Dado que se ha propuesto un modelo de elección modal basado en el precio que soportan los usuarios de cada una de las tres alternativas, las características económicas de la población tendrán influencia sobre las decisiones que finalmente se tomen. Por este motivo se muestran en este apartado las principales características de la población extraídas del Institut d'Estadística de Catalunya y del Instituto Nacional de Estadística.

En 2016 Sant Cugat del Vallès contaba con una población de 87.830 habitantes, para determinar la capacidad económica de dichos habitantes se consulta el indicador de la Renta Familiar Disponible Bruta por habitante. Este indicador cuantifica la renta de que disponen los habitantes para gastar o ahorrar, una vez eliminado el efecto de los impuestos que gravan las rentas familiares, pero incorporando a su vez las transferencias recibidas por las familias procedentes del Sector Público (efecto redistributivo) y del Exterior. Es decir se trata de la suma de las rentas directas, sueldos y salarios, rentas mixtas, intereses y dividendos y rentas inmobiliarias.

Como puede observarse en la Figura 24 este valor es un 30% superior a la media de Catalunya siendo la renta neta media anual de los hogares de 53.767€, datos del año 2014. Además, Sant Cugat del Vallès ha sido varios años consecutivos una de las tres primeras poblaciones con la renta familiar disponible más alta de España según los datos anuales del Instituto Nacional de Estadística.

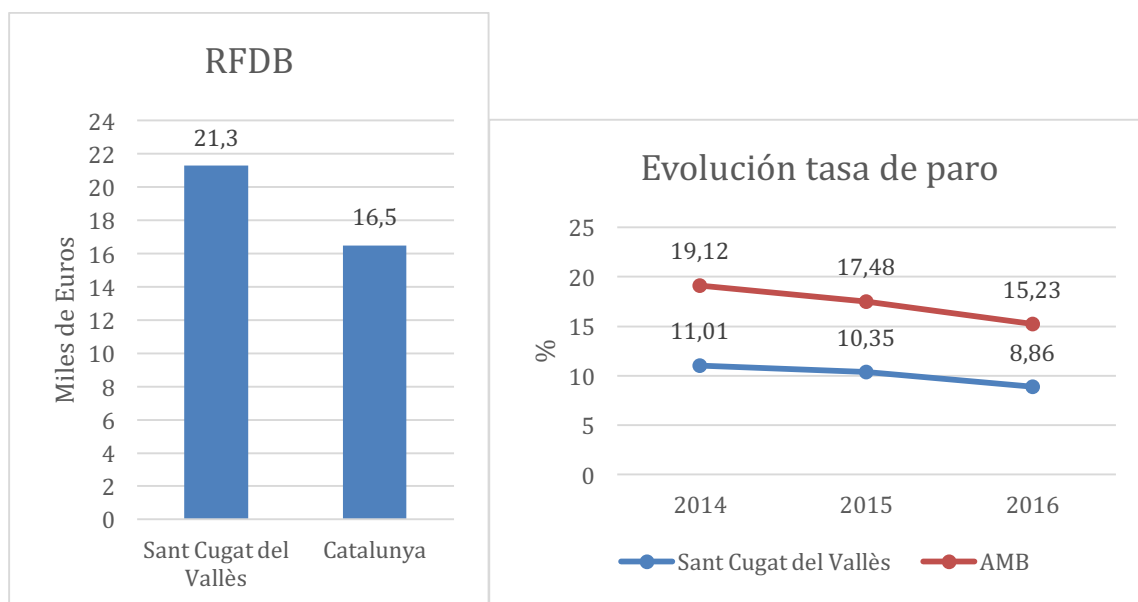


Figura 24. Izquierda: Renta Familiar Disponible Bruta por habitante. Derecha: Evolución de la tasa de paro. Fuente: IDESCAT, INE y elaboración propia.

Otro indicador en relación a la capacidad económica del municipio es la tasa de ocupación. En la parte derecha de la Figura 24 se muestra la evolución de la tasa de paro durante los últimos tres años. Puede observarse que la tasa del municipio de Sant Cugat del Vallès en relación a la tasa de paro del Área Metropolitana de Barcelona, donde dicho municipio también está incluido, es muy inferior. Igual que en el caso de la RFDB la tasa de paro del municipio en cuestión ha sido varios años consecutivos de las más bajas del estado español según los datos anuales del Instituto Nacional de Estadística.

Dado el tipo de análisis que se está realizando, que incluye dos modos de transporte con vehículo privado con una demanda muy elevada, resulta interesante analizar si este hecho podría estar influenciado por un índice de motorización más elevado que la media. Sin embargo en la Figura 25 se aprecia que el índice de motorización del municipio de Sant Cugat es similar al de la comarca del Vallès Occidental y al de la comunidad autónoma de Catalunya, incluso inferior que ambos.

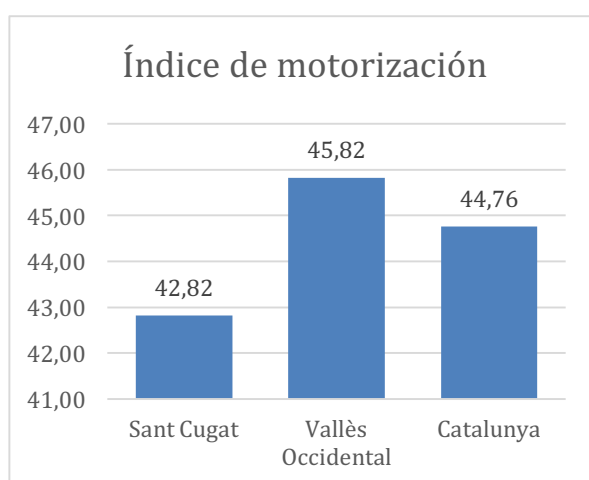


Figura 25. Índice de motorización. Fuente: IDESCAT y elaboración propia.

De estos datos se deduce que nos encontramos ante un municipio singular en que el alto precio de las alternativas con vehículo privado podría no ser del todo disuasorio debido a las características económicas de la población.

6.4.2. Variables

En este apartado se estudia la variabilidad de los Costes Generalizados en función de algunas variables significativas.

- Valor del tiempo:

El valor del tiempo de referencia de Catalunya es de 9,22€, si incrementamos este valor del tiempo los Costes Generalizados de los tres modos de transporte aumentan de manera diferente. El incremento que se aplica en este caso es del 30% ya que la RFDB del municipio de Sant Cugat es justamente un 30% superior a la media, y ya que el valor del tiempo se calcula a partir de la renta éste valor debería incrementarse con la misma proporción.

Tal y como indica la Figura 26 los mayores incrementos en los costes que soportarán los usuarios de cada una de las alternativas se producen en el ferrocarril y en la carretera convencional, alrededor de un 25%, mientras que en el caso de la carretera de peaje es alrededor del 20%. Este hecho indica que para aquellos usuarios para los que el valor del tiempo sea más elevado tenderán a utilizar la alternativa de peaje ya que para valores del tiempo muy elevados los costes de las otras dos alternativas serán mayores a los de la carretera de peaje.

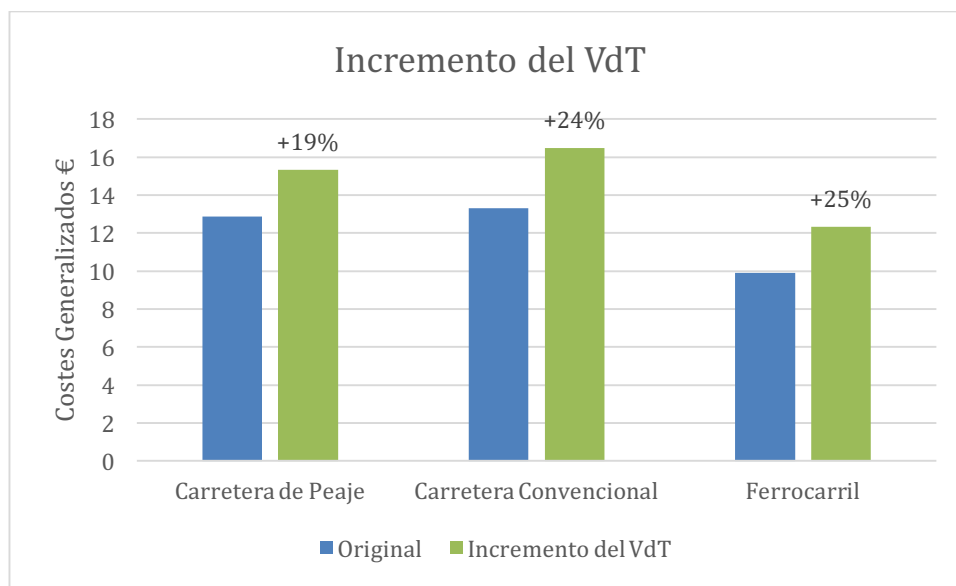


Figura 26. Incremento de los Costes Generalizados en función del VdT. Fuente: Elaboración propia.

- Factores de congestión:

Los usuarios de cualquiera de las dos carreteras se decantan por estas dos alternativas aunque ambas se hallen en condiciones de congestión elevada. Esta congestión se refleja dentro del cálculo de los Costes Generalizados mediante dos indicadores, el factor de incremento de consumo de combustible en condiciones de congestión y el factor de incremento del valor del tiempo de conducción en condiciones congestionadas.

El factor de incremento de consumo de combustible en condiciones congestionadas se ha determinado en apartados anteriores como el doble del consumo respecto a las condiciones normales. Este dato es complejo de estimar ya que depende del tipo de vehículo, del tipo de conductor y de las condiciones generales de la carretera por este motivo se ha estimado aproximadamente como el doble. En la Figura 27 podemos observar que si el consumo fuese cuatro veces mayor en condiciones de congestión los Costes Generalizados tan solo se incrementan

alrededor de un 5%, por este motivo puede despreciarse el error que pueda haberse producido en la estimación de este valor.

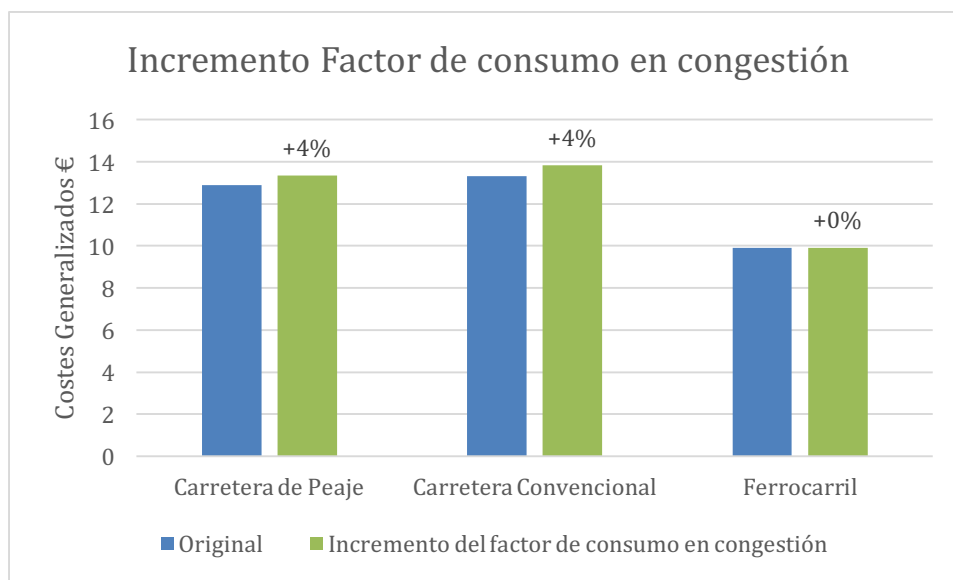


Figura 27. Incremento de los Costes Generalizados en función del factor de consumo. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 28 se determina el incremento de los Costes Generalizados al doblar el factor de ponderación del valor del tiempo de conducción en condiciones de congestión. En los Costes Generalizados originales el valor del tiempo se multiplicó por 1,5 y en los nuevos Costes Generalizados se multiplica por 3.

Se observa que en la carretera convencional sufre mayor incremento ya que el tiempo de conducción en condiciones de congestión es mayor, por este motivo, aquellos usuarios para los que la conducción en condiciones de congestión les resulte más incómoda tenderán a utilizar la carretera de Peaje.

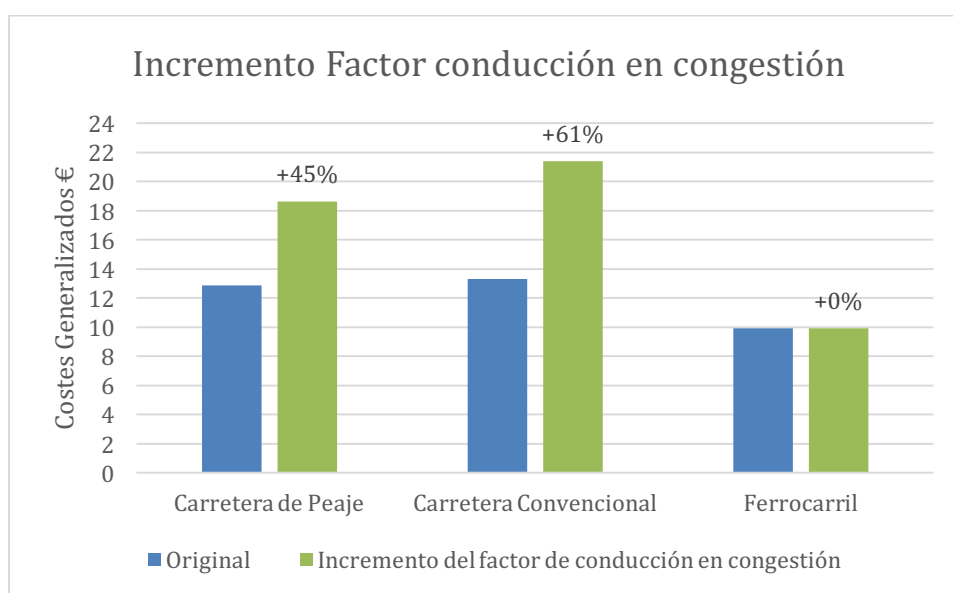


Figura 28. Incremento de los Costes Generalizados en función del factor de conducción en condiciones de congestión. Fuente: Elaboración propia.

- Destinos:

Podría pensarse que uno de los motivos por el que el Coste Generalizado del Ferrocarril es tan bajo es que no se han tenido en cuenta desplazamientos más allá de la estación de Sarrià. Normalmente los desplazamientos realizados en transporte público requieren tiempos de acceso a la estación y tiempos de acceso de la estación final al destino, incluso en algunos casos se deben tener en cuenta transbordos intermedios.

Anteriormente no se ha tenido en cuenta la influencia de estos desplazamientos en destino ya que no se disponen datos de los destinos finales, los usuarios de las tres alternativas alcanzan como punto de llegada común Sarrià en caso de dirigirse a otros destinos de Barcelona podrían optar por otras rutas mediante vehículo privado como podrían ser la C-58 o la B-23. Sin embargo en este punto, a modo de ejercicio, se proponen como destinos hipotéticos de los usuarios de las tres alternativas otras zonas de Barcelona.

Estos destinos hipotéticos se han traducido en aumentos de los tiempos de viaje y las distancias en condiciones congestionadas para las alternativas en vehículo privado, ya que en hora punta toda la ciudad se encuentra en condiciones de congestión. Se han añadido 15 minutos y 4 kilómetros, de esta manera se hace una media entre aquellos usuarios que viajen a los barrios más alejados de Sarrià y aquellos que viajen a los más cercanos.

Para el caso del ferrocarril se ha aumentado el tiempo de viaje en 20 minutos dentro del transporte público en condiciones de vehículos concurridos, se han añadido 2 minutos de tiempo de transbordo con un factor de ponderación 2 del valor del tiempo normal, 2,5 minutos más de tiempo de espera como media entre la espera en hora punta para el metro o el autobús, y también se han añadido 10 minutos de tiempo andando desde la estación al destino final. Estos datos corresponden a datos medios típicos de desplazamientos en Barcelona en transporte público en hora punta.

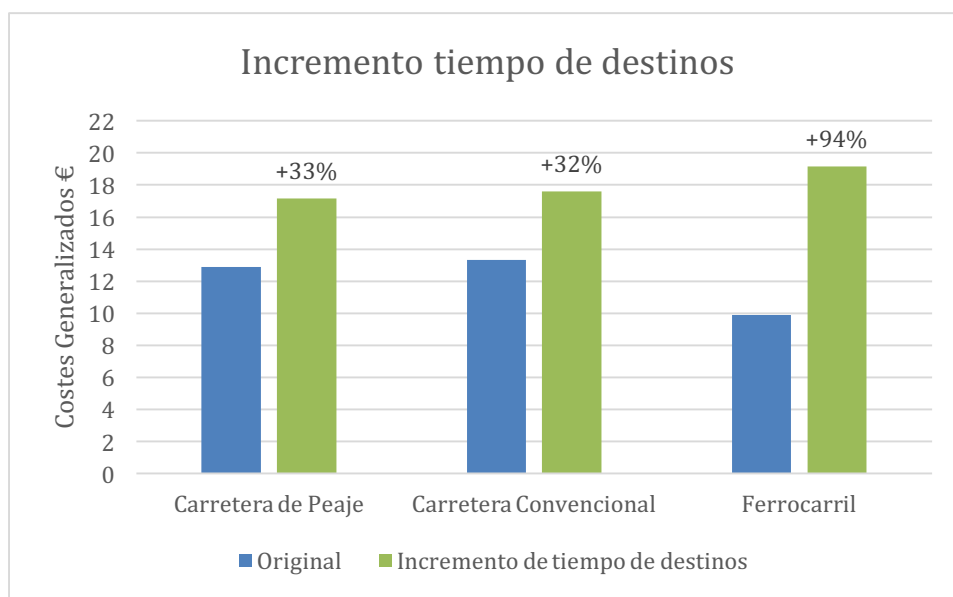


Figura 29. Incrementos de los Costes Generalizados en función de los nuevos destinos. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados se muestran en la Figura 29, como podemos observar el Coste Generalizado del ferrocarril prácticamente se ha multiplicado por dos, este hecho indica que la penalización en los Costes Generalizados del ferrocarril de que se produzcan desplazamientos internos en Barcelona una vez alcanzada la ciudad supone una penalización mucho mayor que los desplazamientos que se producen en vehículo privado dentro de la misma. En estas situaciones, los costes de la alternativa ferrocarril se vería aún más perjudicada que mediante las hipótesis iniciales, a este hecho deberíamos

sumarle que los Costes Generalizados en vehículo privado mediante otras vías de acceso a Barcelona podrían ser inferiores.

Esta distribución de costes en la que se han incluido otros destinos podría responder a la repartición de la demanda actual entre vehículo privado y ferrocarril en la que sólo el 46% de la demanda utiliza esta alternativa.

- Operación del vehículo:

En el cálculo de los Costes Generalizados originales se han incluido los siguientes costes de operación del vehículo: Carburantes, Lubricantes, Neumáticos, Mantenimiento y Amortización. Para muchos usuarios los gastos en Lubricantes, Neumáticos, Mantenimiento y Amortización del vehículo se sufragarían de todas maneras, ya que el hecho de realizar o no el desplazamiento diario en vehículo privado no sería el motivo de la posesión del mismo y éste se utilizaría de todas maneras. Por este motivo en este punto se analiza la influencia de la no inclusión de dichos gastos en el cálculo de los Costes Generalizados, el coste de la gasolina por kilómetro continúa incluido.

Tal y como se aprecia en la Figura 30 los Costes Generalizados de las dos carreteras disminuyen en un 11 y un 14%, sin embargo continúan siendo superiores a los Costes Generalizados de viajar en Ferrocarril, de manera que dicha disminución debida a la posesión del vehículo no sería determinante en el modelo a la hora de escoger una u otra alternativa.

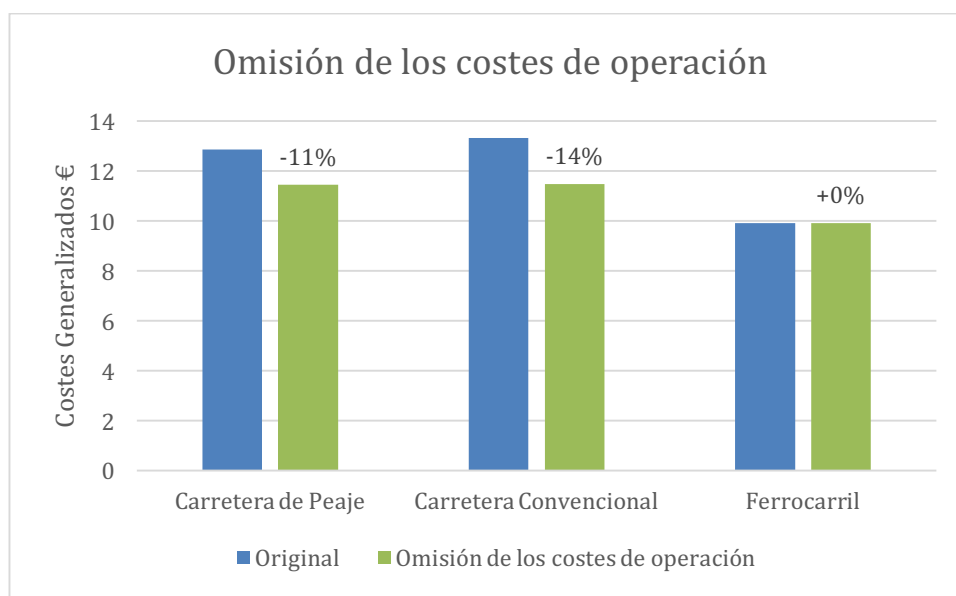


Figura 30. Disminución de los Costes Generalizados omitiendo los costes de operación. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los gastos incurridos por el hecho de viajar en vehículo privado podríamos incluir el gasto de aparcar en Barcelona, en algunos casos el gasto sería cero al disponer de parking gratuito en destino o al ser precisamente el vehículo una herramienta de trabajo. En otros casos se debería añadir el alquiler de una plaza de parking o la amortización por la adquisición de la misma. No se disponen de dichos datos por lo que no se han considerado, en todo caso se determina que aquel usuario que realiza el desplazamiento en coche tiene resuelto el tema del aparcamiento. Si se tuviese en cuenta los Costes Generalizados de las carreteras aumentarían aún más, hecho que no da respuesta a la repartición actual de las demandas entre las tres alternativas.

- Comodidad del tren:

Parece ser que uno de los factores que más influye a la hora de escoger entre la alternativa ferrocarril o las dos alternativas mediante vehículo privado es la comodidad. El realizar los desplazamientos

en ferrocarril supone una un desconfort general, primero se debe acceder a la estación correspondiente, ya sea a pie o mediante otro modo de transporte alternativo, posteriormente se debe esperar al tren y subirse a él en unas condiciones desagradables en hora punta, y además, posteriormente deben realizarse transbordos o desplazamientos a pie.

En este punto el factor de ponderación del tiempo de viaje debido a los desplazamientos en vehículos concurridos, anteriormente 1,5, se ha duplicado. Es decir un usuario multiplica su valor del tiempo de viaje en tren por 3 veces debido a las incomodidades.

En la Figura 31 puede observarse como de esta manera los Costes Generalizados se equiparan. En este caso la distribución de demandas que nos proporciona el modelo es la que se muestra en la Figura 32. Sin embargo podemos observar que mediante el uso de un único factor de penalización al ferrocarril continúa sin estar calibrado el modelo.

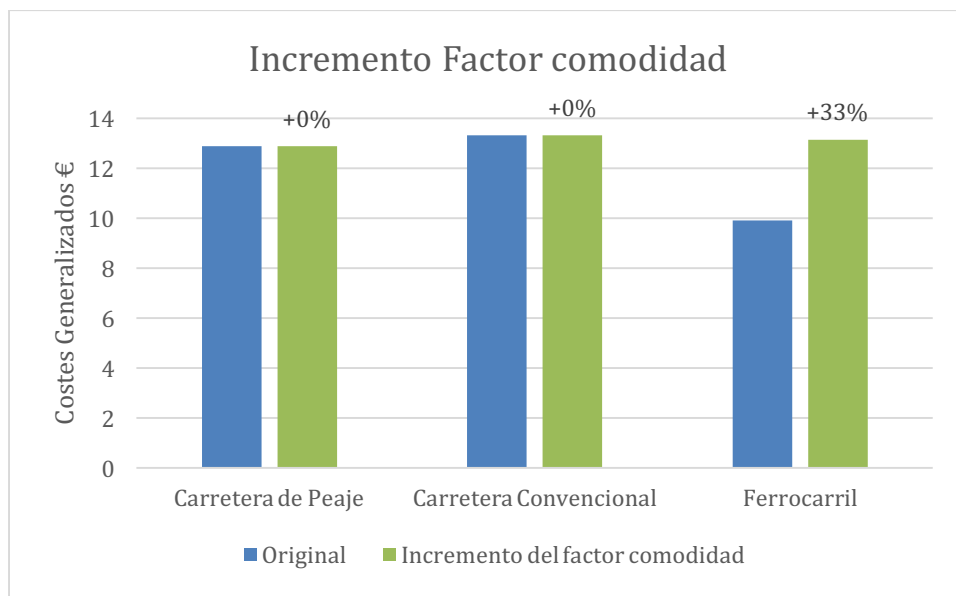


Figura 31. Incremento de los Costes Generalizados en función del factor comodidad del ferrocarril. Fuente: Elaboración propia.

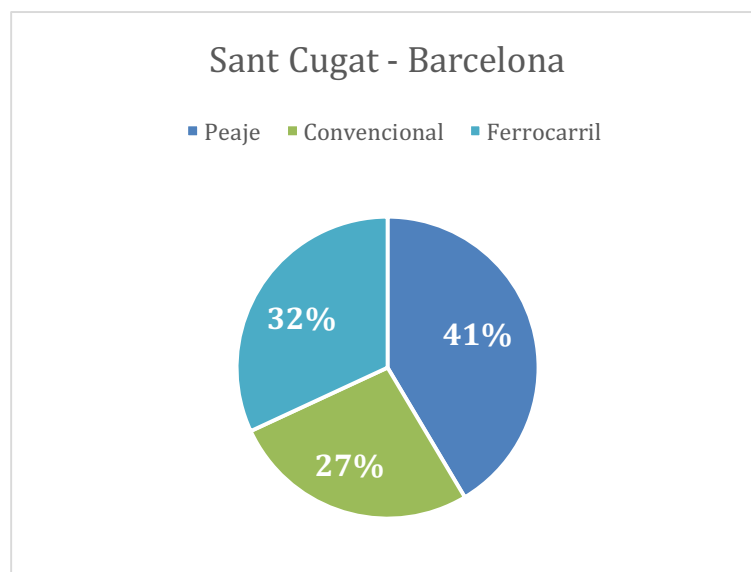


Figura 32. Distribución de demanda según modelo con el incremento del factor comodidad del ferrocarril. Fuente: Elaboración propia.

6.5. Propuesta de calibración

Con toda la información recabada en los apartados anteriores se proponen algunas modificaciones en las variables que permitan calibrar el modelo y que éste de resultados que se correspondan a la realidad.

Se ha visto que el valor del tiempo asignado a los usuarios probablemente debería ser aproximadamente un 30% superior al utilizado anteriormente, de manera que el nuevo valor del tiempo propuesto son 12€/h.

Además, otro de los puntos que es evidente es que el uso del transporte público tiene asociada una penalización por parte de los usuarios que se traduce en la comodidad, por este motivo otro de los factores que se modifica es el factor de ponderación del valor del tiempo dentro del vehículo. Se escoge un factor de 2,5, este valor coincide con el factor de ponderación del valor del tiempo en espera.

El motivo de escoger este mismo factor corresponde a la similitud entre estos dos tiempos de viaje, al viajar en un vehículo tan concurrido como los trenes de FGC en hora punta, los minutos invertidos se convierten en una espera a llegar al destino, tiempo que no puede invertirse en ninguna otra actividad y tiempo en el que el usuario solo desea llegar a su destino o que aparezca el medio de transporte público que espera.

Únicamente modificando estas dos variables, que responden a la realidad en mayor medida que las escogidas inicialmente, los resultados del modelo Logit Multinomial son muy cercanos a la realidad. Los nuevos Costes Generalizados desglosados se muestran en la Figura 33 y la nueva distribución de demandas en comparación con la distribución real se muestra en la Figura 34.

En la distribución de los costes se observa como la mayor parte de los costes son reflejados en el tiempo de viaje, además un detalle importante es que el precio del peaje es equivalente a la diferencia de tiempo invertida en la alternativa carretera convencional hecho que indicaría la correcta valoración del peaje para resultar competitivo con la carretera convencional.

En cuanto a la distribución final que proporciona el modelo calibrado es muy cercana a la realidad, sin embargo la calibración aquí propuesta es simplemente una combinación que se ha considerado lógica entre las muchas que podrían existir. Una manera de obtener la calibración correcta sería la recopilación de datos más exactos, realización de encuestas sobre la valoración del tiempo o ajustes más precisos en algunas variables estimadas.

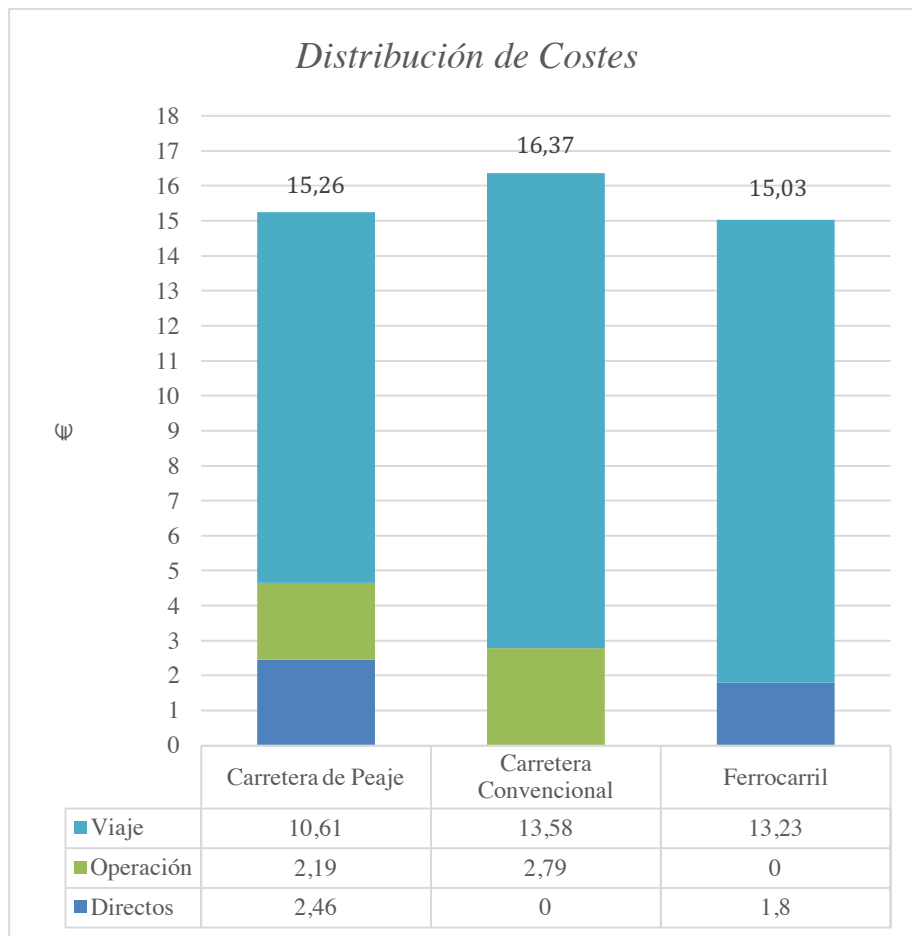


Figura 33. Distribución de costes con el modelo calibrado. Fuente: Elaboración propia.

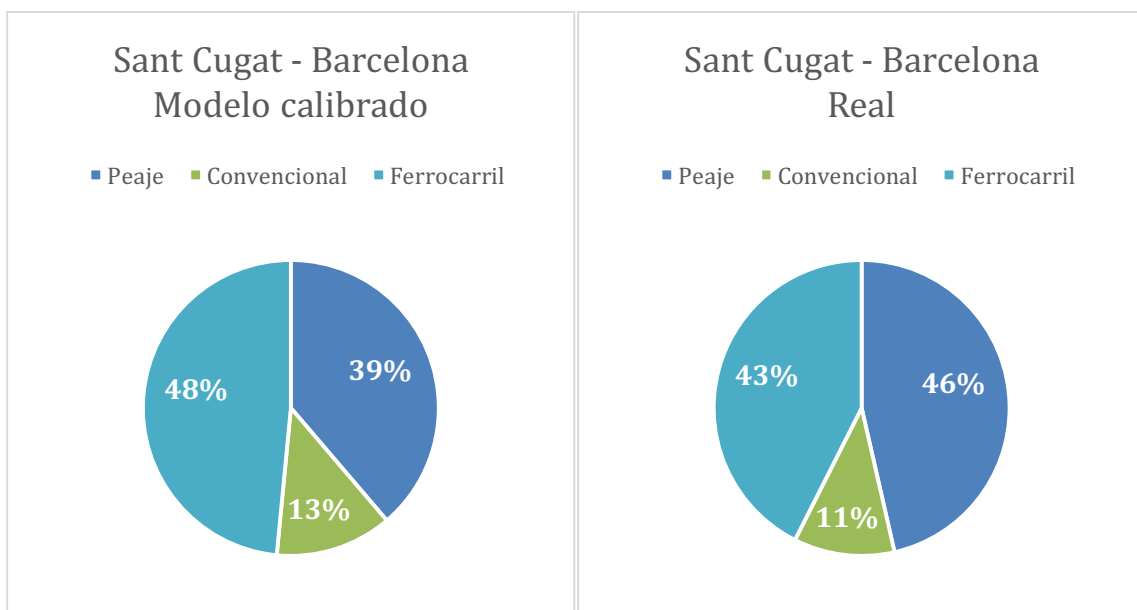


Figura 34. Comparativa de distribución de demanda modelo calibrado vs real. Fuente: Elaboración propia.

6.6. Capacidad del sistema

Uno de los puntos que no se ha tenido en cuenta a la hora de realizar el análisis es la capacidad de cada una de las tres alternativas, es decir la cantidad de demanda que es capaz de absorber el ferrocarril o la cantidad de demanda a partir de la cual se produce congestión en cada una de las carreteras.

6.6.1. Capacidad de las carreteras

Después de analizar la formación y disipación de colas en las dos alternativas que utilizan vehículo privado se constata que su formación viene determinada por la capacidad de absorción de Barcelona.

Para el caso de la carretera de peaje se dispone de una regulación semafórica en la entrada del último túnel de la carretera, a la salida del cual se entra directamente en Barcelona. En este semáforo se activa el color rojo en el momento en que la salida de los Túneles se colapsa debido a la incapacidad de absorción de las vías de Barcelona.

En caso de no regularizar el tráfico comenzarían a formarse colas dentro del túnel y éstas irían extendiéndose aguas arriba. En el momento en que las retenciones en la salida de la vía de peaje son disipadas el semáforo activa el color verde hasta que vuelven a formarse retenciones, momento en que volverá a activar su color rojo.

De esta manera se dispone de un mecanismo de control del tráfico que permite dosificar la demanda que aporta la carretera de peaje a las vías congestionadas de Barcelona, mediante esta dosificación y la llegada progresiva de la demanda a las vías de Barcelona se favorece la absorción de la demanda sin crear cuellos de botella con largas colas de acumulación de gente que tardarían mucho más en disiparse, este método de gestión del tráfico es conocido como Ramp Metering.

En cuanto a la carretera convencional, se dispone de dos semáforos importantes, uno a mitad de camino, en lo alto de la montaña en el barrio de Vallvidrera en el que suelen formarse largas colas debido a su corto intervalo de verde, que además sirve para dosificar igualmente que en el caso del peaje el tráfico que alcanza la ciudad. Se dispone de otro semáforo justo en la entrada de la ciudad en el que suelen crearse también largas colas debido a que aunque éste se ponga verde los coches no pueden avanzar posiciones ya que la vía en la que desemboca la carretera convencional tiene muy poca capacidad de absorción.

Como conclusión queda claro que la capacidad de ambas carreteras viene determinada por la capacidad de absorción de las vías de Barcelona, que en hora punta suelen estar muy congestionadas. Recuperando la teoría de Vickrey, explicada en apartados anteriores, esta capacidad de absorción correspondería a la curva de salidas de la cola, dato que marca la capacidad de la alternativa.

Lo que sí puede determinarse es que la capacidad de la carretera convencional es muy inferior a la de la carretera de peaje debido a que la vía en la que desemboca esta carretera es una arteria menor de la ciudad que está muy congestionada, en el caso de la carretera de peaje se dispone de diversas alternativas a escoger, entre ellas grandes arterias de gran capacidad. Este hecho se hace evidente en la cantidad de demanda que circula por cada una de las alternativas, en la carretera convencional, con mucha menos demanda, se sufren muchas más retenciones que en el caso de la carretera de peaje, por la que son capaces de circular más vehículos a un coste de congestión similar al de la carretera de peaje.

6.6.2. Capacidad del Ferrocarril

Para el cálculo de la capacidad de la alternativa ferrocarril se utilizan las capacidades de los trenes de Ferrocarril de la Generalitat de Catalunya. Actualmente los trenes que realizan los servicios en

dirección Barcelona son la serie 112 y la serie 113 cuyas capacidades se muestran en la Tabla 21. El fabricante proporciona dos capacidades diferentes según si el cálculo de la capacidad se realiza con 4 o 6 personas por metro cuadrado. En este trabajo se ha decidido tomar el dato de 4 personas por metro cuadrado ya que éste es el valor de densidad típica a nivel europeo para referirse a trenes concurridos en hora punta. Existen países asiáticos en los que la densidad de 4 personas por metro cuadrado se supera, sin embargo éste no es el caso que nos ocupa.

4pax/m²	
112	552
113	582

Tabla 21. Capacidad de los trenes. Fuente: FGC.

En apartados anteriores se ha especificado el número de trenes que realizan los servicios en cada hora, de manera que podemos saber la capacidad horaria de que disponen. En la Tabla 22 se especifica la capacidad horaria que proporcionan los trenes con el cálculo de 4 personas por metro cuadrado, aproximado a 500 pasajeros por tren.

Los datos que no disponemos son la demanda que viaja en cada uno de los trenes. En la empresa Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya se conocen las validaciones de las barreras tarifarias en determinados intervalos horarios, en el caso de este trabajo se han presentado de manera horaria, sin embargo si dispusiésemos de la curva completa de validaciones, por minuto por ejemplo, observaríamos que la mayor cantidad de validaciones se produce a medida que nos acercamos a los minutos centrales de la hora punta. De aquí se concluye que aunque sepamos que entre las 7 y las 8 entra en el sistema una determinada cantidad de gente con dirección Barcelona, no significa que esta cantidad de gente ha llegado de forma constante a lo largo de la hora.

Además, debemos tener en cuenta que para cada estación esta curva de llegadas o validaciones sería diferente, las estaciones situadas aguas arriba tendrán una concentración punta más temprana que la situadas en el término municipal de Sant Cugat del Vallés, debido a que para llegar a la hora deseada a Barcelona deberán coger el tren antes al tener que recorrer mayor tramo de la línea. Este hecho implica que los trenes más concurridos serán aquellos que recojan las concentraciones punta y éstos coincidirán en que deberán recoger la mayor cantidad de demanda en todas las estaciones. Esta situación provoca que ciertos trenes circulen a una capacidad cercana a la límite mientras que otros circularán a una capacidad elevada pero inferior a los primeros.

En FGC no se dispone de ningún sistema de medición de la cantidad de gente que circula en un tren, existe un proyecto que pretende instalar un dispositivo en algunos trenes que sea capaz de proporcionar datos de la cantidad de gente que sube y baja del tren en cada una de las estaciones, sin embargo aún no está operativo. En ocasiones se hacen campañas de muestreo en las que se disponen agentes tanto en estaciones como en trenes para contar los usuarios que suben, bajan y viajan en los trenes.

Por todo lo expuesto en este apartado no se pudo calcular la capacidad a la que circulan los trenes actualmente, sin embargo la empresa Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya estima que en hora punta la máxima ocupación es del 90%. Con esta información se supone que todos los trenes que circulan entre las 8 y las 9 circulan con esta ocupación, de esta manera se obtiene la capacidad aproximada que queda disponible en las horas más centrales de la hora punta, detallada en la Tabla 22.

El número de trenes corresponde a la foto estática de la estación de Sant Cugat, de manera que los datos obtenidos indican que los trenes que circulan entre las 8:00 y las 9:00 por Sant Cugat circulan

con una carga de 9.000 pasajeros, ya se hayan subido en estaciones anteriores, en Sant Cugat o posteriores.

8:00-9:00	
Número de trenes	20
Capacidad total	10000
Capacidad disponible	1000

Tabla 22. Comparativa de capacidad y demanda. Fuente: Elaboración propia.

Comparado con la demanda total que es trasladada hasta Barcelona durante las 3 horas estudiadas en este trabajo, 14.700 pasajeros, la suposición realizada indica que el 60% de la demanda se concentra en las horas centrales de la hora punta. Es precisamente esta concentración la que indica el límite de la capacidad de absorción de la línea de Ferrocarril, en este caso 1000 personas es la capacidad de absorción que tiene la línea de FGC en hora punta. Puesto que este valor es pequeño en el siguiente apartado se estudiará el aumento de la capacidad de la línea del metro del Vallès de FGC.

7. SOLUCIONES

Este apartado se centra en la capacidad de la línea Barcelona – Vallès, no se analizarán medidas de aumento de capacidad en las carreteras ya que la manera de descongestionarlas que más beneficios aportaría en términos económicos, sociales y ambientales sería que el ferrocarril fuese capaz de absorber la demanda que les sobra a las mismas.

En primer lugar se detallan las circunstancias que harán aumentar la demanda del ferrocarril y podrían llevarlo a límites cercanos a su capacidad, posteriormente se analizan las diferentes posibilidades de crecimiento que tiene la línea en términos de capacidad.

7.1. Incremento de la demanda

Como se ha visto en el apartado anterior la línea Barcelona – Vallès tiene un margen pequeño de absorción de nueva demanda que podría verse sobrepasado por las circunstancias que se detallan a continuación.

Es importante destacar que una vez alcanzada la capacidad estimada en el apartado anterior no significaría que la línea de ferrocarril no sería capaz de transportar a más personas, simplemente los trenes empezarían a llevar a más gente y las condiciones de viaje serían peores. La densidad con la que se ha estimado la capacidad es de 4 personas por metro cuadrado, en países como Japón se estima que la densidad del metro en hora punta alcanza las 7 personas por metro cuadrado, y los fabricantes de material móvil proporcionan los datos de la capacidad de los trenes con 4 o 6 personas por metro cuadrado. Mediante esta información se deduce que en caso de superar la capacidad estimada, las condiciones de viaje comenzarían a ser menos confortables y se haría necesario tomar medidas pero los usuarios continuarían alcanzando sus destinos.

7.1.1. Nuevas estaciones

Actualmente la línea del Vallès de Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya está configurada tal y como muestra el esquema de la Figura 35. La demanda analizada en este trabajo ha sido aquella que viaja desde el municipio de Sant Cugat hasta Barcelona, que se ve influenciada en términos de capacidad por la demanda que baja desde estaciones situadas aguas arriba. Son precisamente éstas estaciones las que han sido modificadas en los últimos años.

En Julio de 2015 se inauguraron tres estaciones nuevas en el ramal de Terrassa. Vallparadís – Universitat, cercana al campus de la UPC; Terrassa Estació del Nord, donde conectará con la estación de Renfe; y Terrassa Nacions Unides, en la carretera de Matadepera que es el final de trayecto. Antes del 2015 Terrassa, cuarta ciudad catalana con mayor número de habitantes (215.000) solo contaba con la estación de Terrassa Rambla y otra en la urbanización de Les Fonts, en estos momentos la población cuenta con cinco estaciones de FGC y dos de Renfe.

En Septiembre de 2016 se inauguraron dos estaciones en el ramal de Sabadell. Can Feu – Gràcia y Sabadell Plaça Major que substituyen a las dos estaciones que hasta entonces tenía Sabadell. En Julio de 2017 se inauguraron las tres últimas estaciones de la prolongación de Sabadell. Creu Alta, en la zona comercial del Eje Macià; Sabadell Nord que conecta con la estación de Renfe del mismo nombre; y Parc del Nord, en los barrios periféricos septentrionales. Antes de este año Sabadell, 208.000 habitantes, contaba con dos estaciones de FGC, ahora cuenta con cinco estaciones de FGC y tres de Renfe.



Figura 35. Configuración de la línea del Vallès. Fuente: Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya.

La extensión de la línea en Terrassa ha supuesto un aumento de la demanda igual que se prevé un aumento de la demanda debido a la extensión en Sabadell, en el gráfico de la Figura 36 puede observarse esta evolución. En azul se presenta el crecimiento real de la demanda debido a las nuevas estaciones de Terrassa, se muestra la demanda previa (2014), la correspondiente al año de la inauguración (2015), y la del primer año a pleno rendimiento (2016). En verde se presenta la previsión interna de FGC de incremento de demanda debido a la ampliación en Sabadell, se muestra la demanda previa (2016), la correspondiente al año de la inauguración (2017), y la del primer año a pleno rendimiento (2018). Dado que son dos poblaciones similares en cuanto a cantidad de habitantes y a demanda previa, se prevén crecimientos parecidos, aunque en el caso de Sabadell, al disponer de una estación más, que servirá a más población, el crecimiento se prevé algo superior.

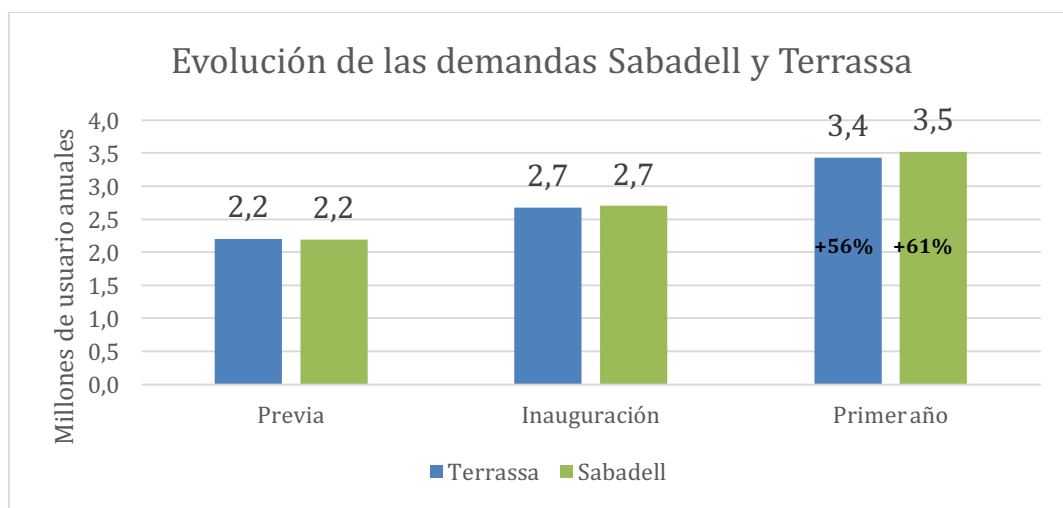


Figura 36. Evolución de la demanda debido a las prolongaciones. Fuente: Ferrocarrils de la Generalitat e Catalunya.

El gráfico nos muestra, respecto a la situación sin ampliación, unos incrementos de demanda de las estaciones de Terrassa y Sabadell de 1,2 y 1,3 millones de viajes anuales respectivamente. Estos

datos corresponden únicamente al primer año de puesta en servicio de las estaciones de manera que se prevé que la demanda continúe aumentando a medida que se consoliden las ampliaciones.

La demanda total de la línea Barcelona – Vallès se situó en 2016 en prácticamente 60 millones de viajeros al año, de manera que los incrementos que suponen las prolongaciones son aproximadamente del 2,5% de la demanda de la línea. Un estudio interesante sería interesante analizar qué cantidad de esta demanda se concentra en la franja de la hora punta para poderla comparar con la capacidad estimada en el apartado anterior.

7.1.2. *Aumento general de la movilidad*

Otro de los factores determinantes que harán aumentar la demanda de la línea Barcelona – Vallès es el incremento general de la Movilidad experimentado durante los últimos años en el Área Metropolitana de Barcelona.

La Enquesta de Mobilitat en Dia Feiner (EMEF) es una estadística de periodicidad anual promovida por la Autoritat del Transport Metropolità (ATM), l'Ajuntament de Barcelona, l'Àrea Metropolitana de Barcelona (AMB) i l'Associació de Municipis per la Mobilitat i el Transport Urbà (AMTU). Su objetivo es conocer las características básicas de la movilidad en día laborable (de lunes a viernes no festivos), de la población mayor de 16 años residente en el ámbito del Sistema Tarifario Integrado de Barcelona.

En la Figura 37 se han recogido los datos de reparto modal y cantidad de desplazamientos de las diferentes encuestas realizadas durante los años comprendidos entre 2008 y 2015. Los datos muestran el reparto modal de los millones de desplazamientos producidos en toda la población residente en el ámbito territorial del Sistema Tarifario Integrado, incluyendo desplazamientos intercomarcales e intracomarcales. Estas encuestas tienen en cuenta todos y cada uno de los desplazamientos diarios, es decir, ir y volver al trabajo correspondería a dos desplazamientos diferentes. En el gráfico puede observarse un incremento general de los desplazamientos durante los últimos años, después de la caída debida a la crisis. El repunte en el modo de transporte es especialmente notable tanto a pie como en coche, aunque en general el número de desplazamientos aumenta en todos los modos de transporte.

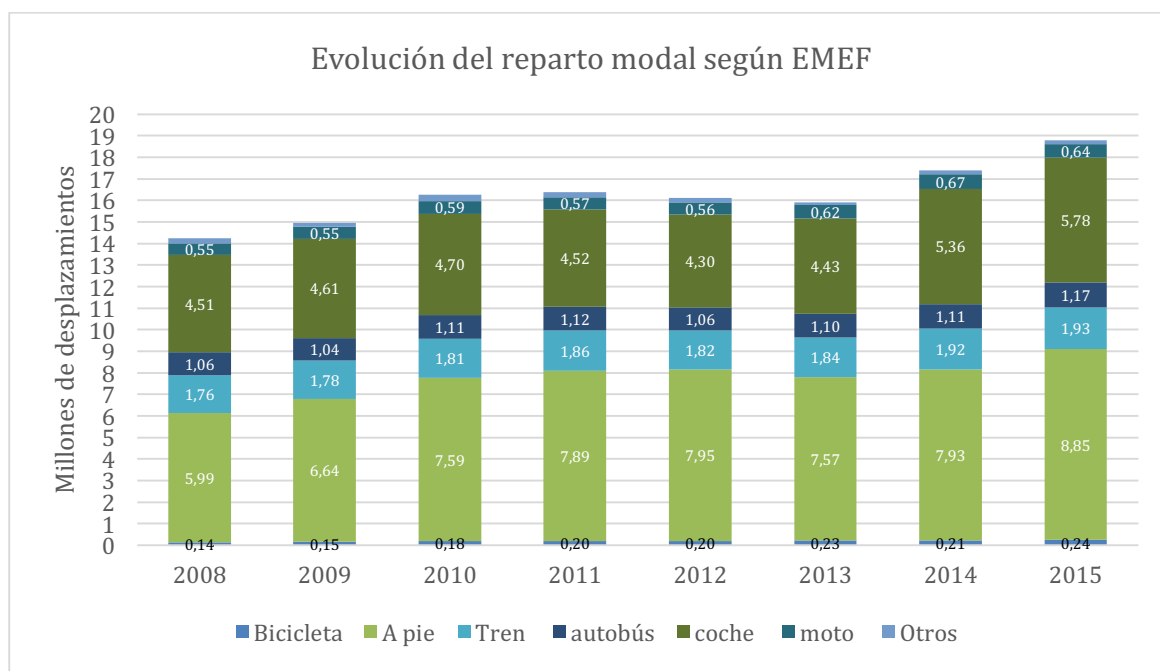


Figura 37. Evolución del reparto modal según EMEF. Fuente: Elaboración propia a partir de EMEF.

Una vez vista la tendencia general en todos los modos de transporte y con la conclusión de que el aumento de los usuarios del transporte público no se debe a un trasvase de demanda entre modos de transporte, como podría ser del coche, resulta interesante conocer las estadísticas concretas del transporte público.

En la Figura 38 se puede observar la evolución mensual de la demanda interanual de transporte público de los últimos años, también el ámbito de todo el Sistema Tarifario Integrado. En este caso los datos se presentan en millones de viajeros anuales, en este caso se incluyen datos de todos los días del año tanto laborables como festivos. También se debe tener en cuenta que los datos presentados a continuación son datos reales mientras que los anteriores son basados en encuestas, por estos motivos los datos absolutos no son comparables con el gráfico anterior.

En la Figura 38 se hace evidente el crecimiento de la demanda, un crecimiento sostenido y continuado iniciado en el 2013. En estos datos se incluyen las demandas de todos los operadores del ámbito del transporte metropolitano, los datos desglosados se muestran en la Figura 39. Puede observarse que en los últimos años se produce un incremento de la demanda en todos y cada uno de los modos de transporte. Debe comentarse la excepción del metro en el año 2016 que sufre un descenso de demanda debido a las huelgas y conflictos que tuvieron lugar aquel año que perjudicaron notablemente el servicio.

Por último, siguiendo la exposición de lo más general a lo más concreto, se exponen los resultados de la línea Barcelona – Vallès. En la Figura 40 se hace evidente el mismo crecimiento se la demanda sostenido y continuado observado en los gráficos anteriores. El crecimiento producido entre 2015 y 2016 es de 1,8 millones de pasajeros, recuperando los datos del apartado anterior donde el crecimiento en la demanda debido a la inauguración de las nuevas estaciones se ha determinado en 1,2 millones de pasajeros, se determina que todo el crecimiento no es únicamente debido a la ampliación de la línea, sino que también influye la tendencia general que se observa en toda el área metropolitana de Barcelona.

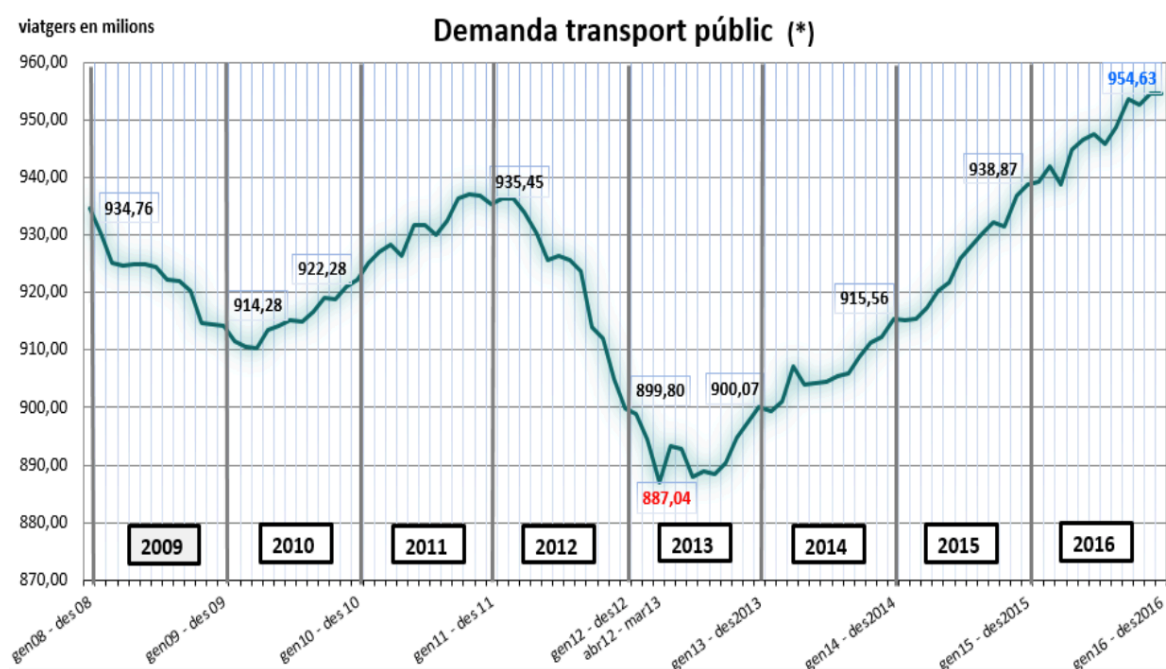


Figura 38. Evolución de la demanda del transporte público en el Área Metropolitana de Barcelona. Fuente: Autoritat del Transport Metropolità.

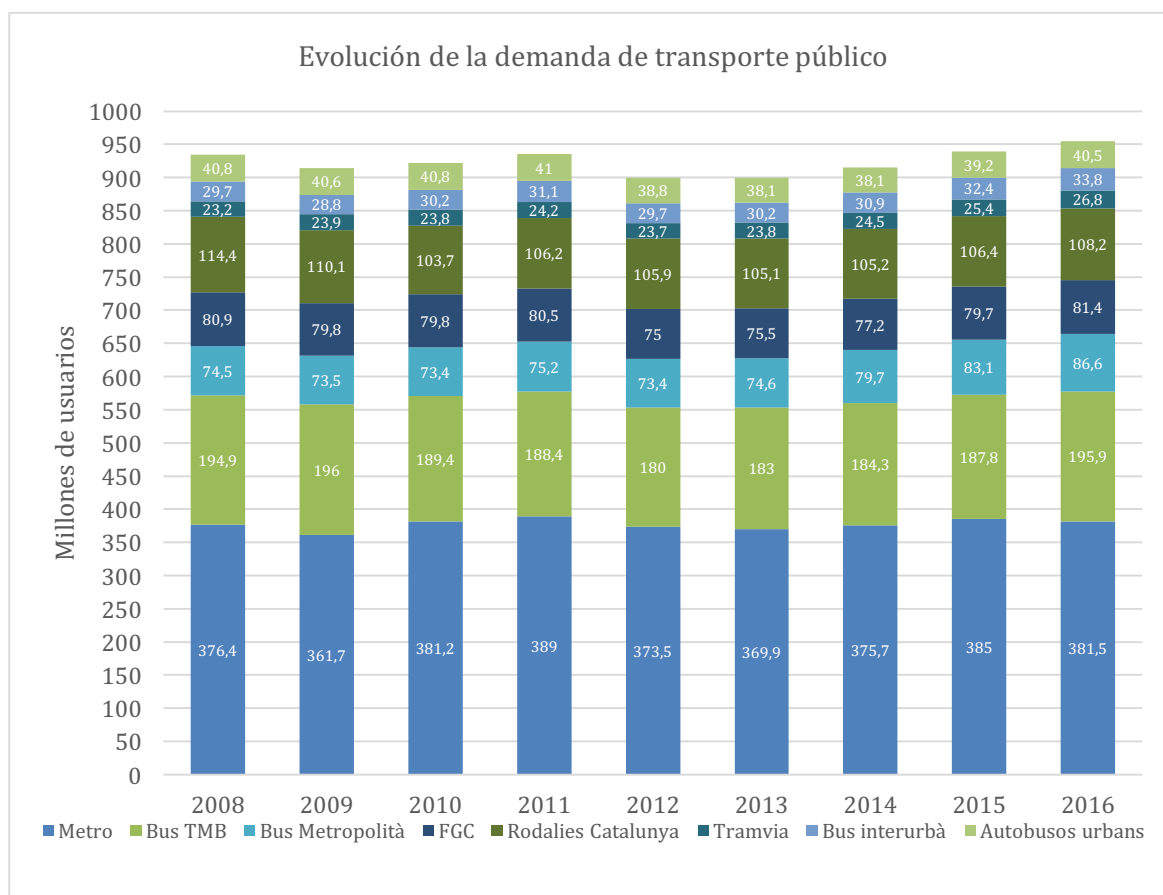


Figura 39. Evolución de la demanda de transporte público desglosada. Fuente: Autoritat del Transport Metropolità.

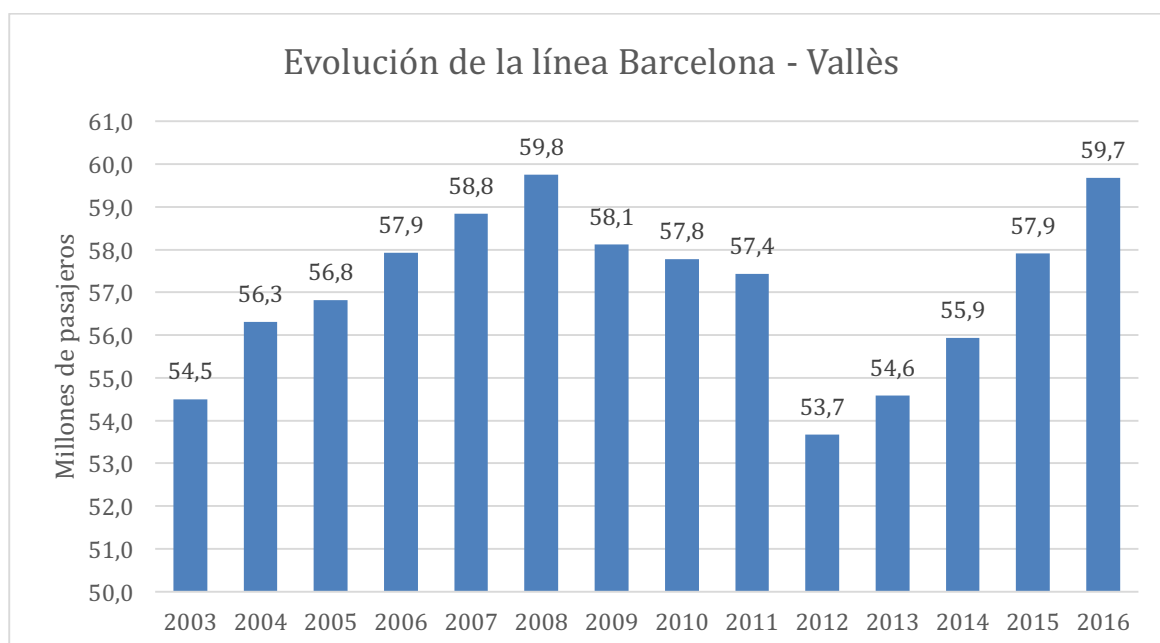


Figura 40. Evolución de la demanda de la línea Barcelona - Vallès. Fuente: Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya.

Mediante esta exposición puede concluirse que se está produciendo un aumento de la movilidad a nivel general en todos los modos de transporte y que este incremento está afectando también a la línea que en este trabajo se ha estudiado.

7.1.3. *Prohibiciones vehículo privado*

Las prohibiciones que se aplicarán en un futuro cercano harán que varios modos de transporte público vean aumentada su demanda ya que los usuarios se verán obligados a buscar alternativas. El caso de la línea Barcelona Vallès también notará estos efectos ya que sus mayores competidores son alternativas que utilizan el vehículo privado. También es cierto que otros usuarios del vehículo privado se vean obligados a cambiar de modo de transporte por algunas penalizaciones que se están aplicando al vehículo privado en la ciudad actualmente como la reducción de carriles en grandes arterias de la ciudad, sin embargo este tema no se tratará aquí.

A continuación se explican las medidas previstas para diferentes episodios de contaminación ambiental. Un episodio de contaminación ambiental es una circunstancia en que los niveles de contaminantes del aire superan los valores límite recomendados por la OMS y la UE y se convierten en nocivos para la salud, son producidos por una coincidencia de circunstancias ambientales como situaciones climáticas anticiclónicas caracterizadas por la ausencia de viento y precipitaciones.

En Barcelona, debido a estos episodios de contaminación, han comenzado a tomarse medidas para reducir los efectos de estos episodios en la población.

Se han determinado dos zonas: **Ámbito 40**, que incluye 40 municipios declarados Zonas de Protección Especial del Ambiente Atmosférico, algunas medidas serán aplicadas en esta zona por todos los municipios y además cada uno de ellos podrán establecer otras medidas particulares con el mismo objetivo de mejora de la calidad del aire; Zonas de bajas emisiones del ámbito de las Rondas de Barcelona que corresponde al área formada por el término municipal de Barcelona y algunos colindantes tal y como podemos observar en la Figura 41.



Figura 41. Zonificación del Área Metropolitana de Barcelona para episodios de contaminación. Fuente: Ayuntamiento de Barcelona.

Por otro lado la Dirección General de Tráfico (DGT) realizó una clasificación del parque de vehículos correspondiente únicamente al 50% de los vehículos más limpios del parque, lo que suponen unos 16 millones aproximadamente. Esta categorización viene dada por el Plan nacional de calidad del aire y protección de la atmósfera en el que se afirma que el tráfico rodado es la principal fuente de emisiones de micropartículas y dióxido de nitrógeno en las ciudades y se propone en él la clasificación de los vehículos en función de los niveles de contaminación que emiten. La clasificación del parque de vehículos tiene como objetivo discriminar positivamente a los vehículos más respetuosos con el medio ambiente y ser un instrumento eficaz en políticas municipales, tanto restrictivas de tráfico como de promoción de los vehículos más limpios. La clasificación se basa en

el tipo de motor, eléctricos, híbridos, gasolina o diésel y de la categoría Euro al que pertenezcan. A partir de esto se clasifican en las etiquetas 0, ECO, C y B, de más limpios a menos respectivamente.

Con estas medidas previas, las restricciones que está previsto que se apliquen son las siguientes:

- A partir del 1 de diciembre de 2017:

En caso de episodio de contaminación, las furgonetas anteriores a Euro 1 (matriculadas antes de 1994) y los turismos Euro 1 y anteriores (matriculados antes de 1997) no podrán circular dentro de la Zona de Bajas Emisiones del Àmbit 40.

Dentro de la Zona de bajas emisiones del ámbito de las Rondas de Barcelona la medida afectará inicialmente a los turismos sin etiqueta de la DGT (vehículos de gasolina anteriores al 2000 y diésel anteriores al 2006) y a las furgonetas anteriores a Euro 1 (matriculadas antes del 1 de octubre de 1994). Queda exentos de manera permanente los vehículos de personas con movilidad reducida, los servicios de emergencia (policia, bomberos, ambulancias) y los servicios esenciales (médico, funerario). Queda exentos durante 2017 las motos, los camiones, los autocares, los autobuses y las furgonetas Euro1, Euro2 y Euro3.

- A partir del 1 de enero de 2019:

Las furgonetas anteriores a Euro 1 (matriculadas antes de 1994) y los turismos Euro 1 y anteriores (matriculados antes de 1997) no podrán circular durante los días entre semana en toda la zona del Àmbit40.

- A partir del 1 de enero de 2020:

Prohibición permanente de circulación dentro de la Zona de bajas emisiones del ámbito de las Rondas de Barcelona para todos los vehículos sin etiqueta de la DGT (de gasolina anteriores al 2000 y diésel de antes de 2006).

- A partir del 1 de enero de 2025:

Prohibición permanente de circulación dentro de los municipios del Área Metropolitana de Barcelona AMB de los vehículos sin etiqueta de la DGT (de gasolina anteriores al 2000 y diésel de antes de 2006).

7.2. Soluciones posibles

En la línea Barcelona – Vallès existen tres posibles escenarios de crecimiento ferroviario en relación a la oferta. Actuaciones en la señalización ferroviaria, es decir sobre el sistema de regulación del tráfico ferroviaria de forma que se incremente la densidad de circulaciones ferroviarias reduciendo el intervalo en las secuencias de sucesión de trenes. Reorganizando la oferta comercial de las líneas potenciando las circulaciones que se realizan hacia el Vallès y recortando en servicios urbanos mediante lanzaderas, o finalmente ejecutando nueva infraestructura ferroviaria.

7.2.1. Señalización

Los sistemas de señalización ferroviaria permiten gestionar la circulación de trenes de una forma segura y automatizada. El principio básico de estos sistemas es la creación de los llamados cantones, que son tramos en los que se divide la vía. Cuando desde una estación se expide un tren, este sale a la vía y ocupa el primer cantón. Cuando el cantón está ocupado, ningún otro tren puede entrar en él. Conforme el tren avanza, va dejando cantones libres tras de sí. Los cantones liberados pueden ser inmediatamente ocupados por otro tren, de tal manera que la distancia mínima entre dos trenes es de un cantón.

Los cantones detectan la presencia de un tren mediante los circuitos de vía en el caso de la línea Barcelona Vallès. Este sistema consiste en realizar un circuito eléctrico a través de los carriles que se cortocircuita cuando un tren une eléctricamente a través de sus ruedas ambos carriles. Cuando un tren accede al cantón, lo cortocircuita, el sistema lo considera ocupado, y se actúa sobre la señalización correspondiente y normalmente se actúa también sobre la señalización de cantones contiguos. Se considera libre cuando el tren lo abandona y deja abierto de nuevo el circuito sobre los carriles. Una de sus ventajas es la ruptura del circuito cuando se rompe el carril, protegiendo el cantón en caso de una rotura de carril, ya que el efecto sobre la señalización es el mismo que si estuviera un tren ocupándolo.



Figura 42. Esquema de cantones con señalización. Fuente: Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya.

Los actuales estudios de capacidad concluyen que recantonando la línea en bloques más pequeños es posible un incremento de capacidad de 4 trenes a la hora hacia el valles, lo que representa un incremento de capacidad de 2.000 plazas a la hora.

Una vez alcanzado el límite técnico, es decir, el canton de menor longitud posible, el siguiente escenario de incremento de la oferta vendría dado no ya por una modificación, si no por un cambio en el sistema de control de tráfico.

El sistema actual de la línea Barcelona – Vallès es el ATP (Automatic Train Protection), un sistema de seguridad que supervisa la conducción en trenes y aplica el freno de emergencia o impide otras acciones cuando no se cumplen algunas condiciones de seguridad. Este sistema se compone de dos partes, las balizas colocadas en la vía, que informan al tren de las condiciones que se tienen que cumplir y que obtienen de los enclavamientos como velocidad máxima, punto y lado de apertura de puertas o situación de las señales entre otras y los elementos a bordo del tren, que comprueban si la circulación cumple lo establecido, si no cumple se aplica el freno de emergencia, o en algunos caso impide una determinada acción como abrir las puertas si el tren no está en el punto adecuado.

El sistema actual se basa en códigos de velocidad, de manera que el intervalo mínimo podría ser mejorado mediante un sistema basado en códigos de distancia o de cantón móvil. La representa estos sistemas de manera esquemática.

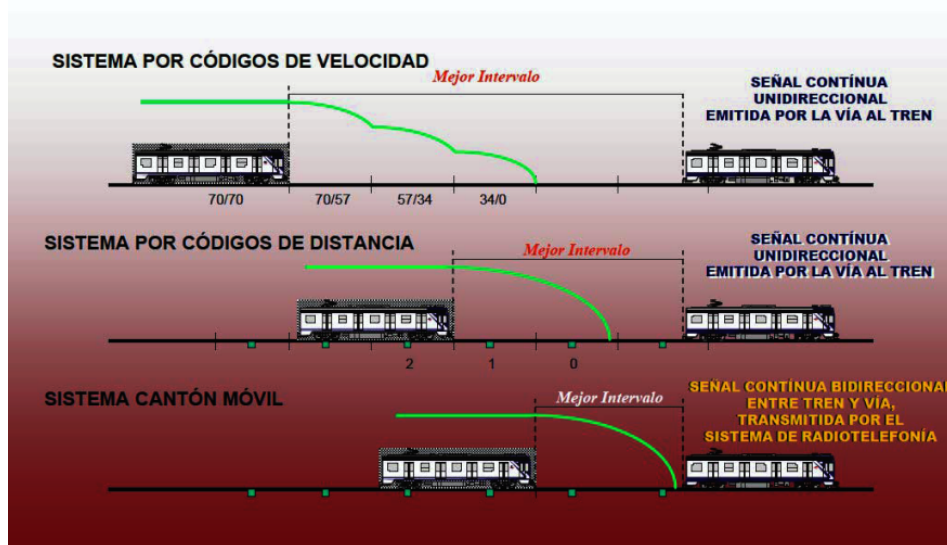


Figura 43. Sistemas de control del tráfico. Fuente: Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya.

7.2.2. Reordenación líneas

Este escenario es el que actualmente se está desarrollando, debido a la ampliación de la línea Barcelona – Vallès tanto en el ramal de Sabadell como en el de Terrassa se ha licitado la compra de 15 nuevas unidades que permitan ampliar la oferta de trenes actual. A continuación se presentan los detalles de los nuevos escenarios que se plantean

Los objetivos principales son: maximizar la capacidad de transporte de la línea manteniendo y mejorando la robustez del servicio frente a perturbaciones, reducir los tiempos de viaje entre el Vallès y Barcelona y viceversa, optimizar los recursos asociados a los ciclos de material y turnos de personal, optimizar los costes de explotación y minimizar recorridos en vacío. Los objetivos secundarios son: garantizar la correspondencia a Sant Cugat entre los trenes provenientes de cada ramal, garantizar la correspondencia con el Funicular de Vallvidrera y la lanzadera de Sarrià (L12), mejorar la legibilidad del horario en horas valle y disponer de planes de contingencia operativos para los diversos supuestos de incidencia para agilizar las tareas de regulación.

Además, de estos objetivos deben tomarse una serie de decisiones estratégicas que condicionarán los nuevos servicios: La línea L7 mantiene su servicio o se convierte en lanzadera Gràcia – Avenida Tibidabo, los servicios S1 Barcelona – Terrassa y S2 Barcelona – Sabadell tienen o no tienen las mismas frecuencias, Plaza Catalunya tiene andenes exclusivamente dedicados a cada una de las diferentes líneas o los andenes son compartidos entre todas, se mantiene o no se mantiene el servicio de trenes escolares.

Los condicionantes de las decisiones son los siguientes: frecuencia en hora punta máxima para el conjunto de todas las líneas que pasen entre Porvenza y Plaza Catalunya 32 trenes por sentido, amplitud horaria actual, parque de material rodante previsto para 2019 el actual más 15 unidades, análisis de capacidad del nudo de Sant Cugat, análisis de capacidad de la terminal de Plaza Catalunya, previsión de demanda.

Finalmente en la Tabla 23 se muestran los escenarios que están siendo analizados para ser implantados y conseguir así el incremento de capacidad necesario.

	Frecuencia 5' de Terrassa i Sabadell con L7 cada 8' (E1)	Frecuencia 5' de Terrassa y Sabadell con lanzaderas entre Tibidabo y Gràcia (E2)	Frecuencia 5' de Terrassa i Sabadell con reducción de L7 directos (E3)
Con servicios semidirectos (SD)	E1 SD	E2 SD	E3 SD
Sin servicios semidirectos (PU)	E1 PU	E2 PU	E3 PU

Tabla 23. Escenarios analizados para los nuevos servicios. Fuente: Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya.

7.2.3. Nueva infraestructura

El Plan Director de Infraestructuras del transporte público colectivo 2011-2020 contempla la ampliación de la red de Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya mediante el túnel de Horta.

Se plantea la prolongación de la actual estación de Plaza Catalunya por la ronda de Sant Pere en dirección al distrito 22@, y desde allí hacia Horta y el Vallès por un nuevo túnel a través de

Collserola, hasta enlazar de nuevo con la red de FGC en un punto a determinar. El hito marcado en el PDI es tener para 2020 un proyecto constructivo redactado que permita licitar las obras.

En la Figura 44 se muestran las actuaciones contempladas en el PDI en relación a la red de Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya. La ampliación de la red mediante el túnel de Horta permitiría ampliar la frecuencia de trenes que bajan hasta Barcelona y por consiguiente la capacidad ofertada, además de reducir los tiempos de viaje de muchos usuarios a diferentes destinos de Barcelona.

En los últimos meses se ha anunciado que el actual gobierno de la Generalitat tendría intención de recuperar el proyecto mencionado, la idea sería redactar el proyecto durante este mandato para poderlos construir en cuanto el Gobierno catalán tenga disponibilidad financiera para invertir en nuevas infraestructuras. El problema del proyecto es la inversión necesaria, el PDI cifra en torno a 1.600 millones de euros, 500 millones más de lo que costaría acabar la línea 9 del metro.

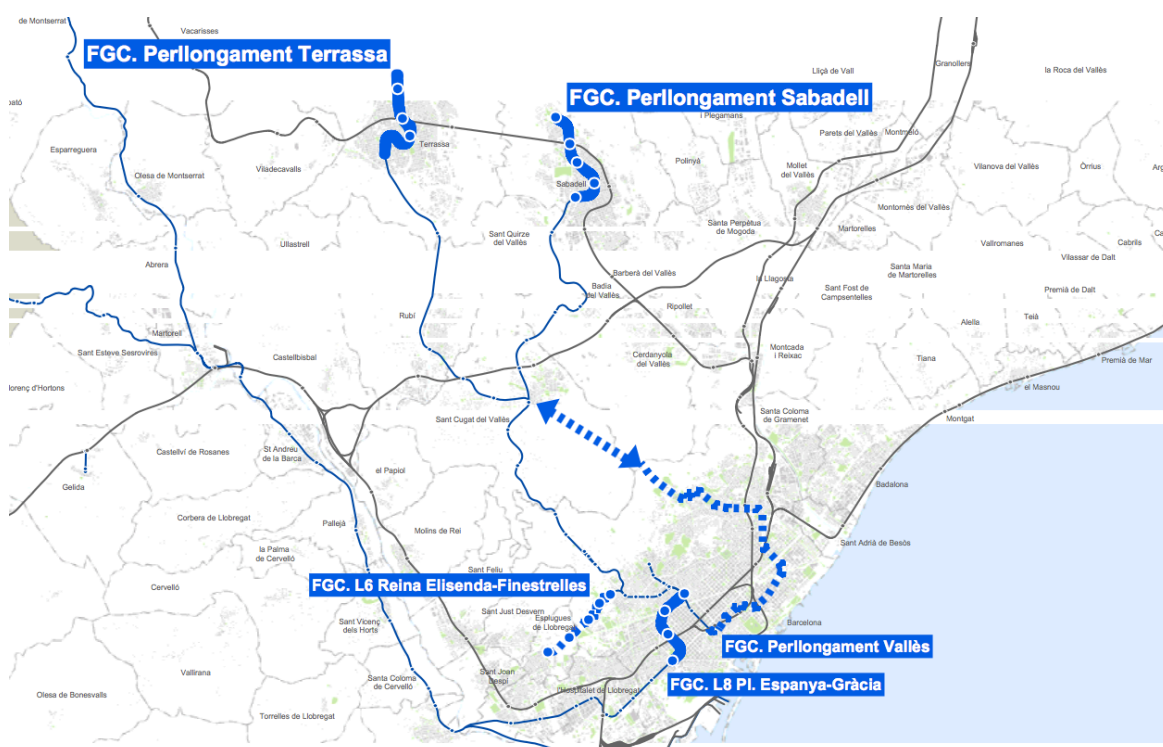


Figura 44. Actuaciones contempladas en el PDI para FGC. Fuente: PDI.

La primera fase del proyecto de ampliación de la línea mediante el túnel de Horta contemplada en el Plan Director de Infraestructuras es la cola de maniobras de Plaza Catalunya. Este proyecto consiste en la ampliación de la línea unos 200 metros a partir de la última estación, mediante esta ampliación sería posible realizar maniobras entre diversos trenes que permitiría descongestionar la estación terminal y aumentar la frecuencia de trenes.

Este proyecto fue pospuesto debido a la gran inversión necesaria y a que debe levantarse toda la Plaza de Catalunya durante al menos 2 años, hecho que se aprovecharía para realizar otras infraestructuras pendientes como por ejemplo la estación intermodal entre metro, cercanías y FGC para lo que se necesitaría aún más inversión.

7.3. Otras soluciones

Existen otras soluciones para aumentar la capacidad de la línea, que en el caso de la línea Barcelona – Vallès no pueden aplicarse.

Podría aumentarse el número de coches por tren, actualmente cada tren lleva cuatro coches y podrían realizarse composiciones de, por ejemplo, ocho coches, para lo que sería necesario realizar una doble parada en cada estación. Esta solución no es factible ya se aumentarían los tiempos de parada, aumentando así el tiempo de viaje total del usuario y empeorando el servicio prestado. Además, debido a los reducidos intervalos de paso que tiene la línea, mediante esta solución se reducirían el número de circulaciones a la hora de tal manera que llegarían a ser menos de la mitad, de manera que la duplicación de la capacidad ganada en cada circulación se vería contrarrestada por la reducción de circulaciones.

Otras de las soluciones clásicas para aumentar la capacidad es utilizar coches de dos pisos, en el caso de la línea Barcelona – Vallès no es posible por temas de gálibos. Es una línea con los gálibos muy ajustados de manera que la adquisición de coches ligeramente mayores supondría tener que modificar muchos tramos de la línea. Otro de los motivos es que en el caso de líneas que funcionan con frecuencias muy elevadas es una solución poco efectiva ya que hace aumentar los tiempos de parada en cada estación al ser trenes más lentos de descargar.

Por último se podrían aplicar conceptos de gestión de la demanda como por ejemplo disminuir la concentración de los minutos centrales de la hora punta mediante incentivos a los usuarios para que viajen en franjas horarias menos congestionadas. Esta medida es poco efectiva ya que estamos hablando de unos horarios muy poco flexibles y poco margen para los incentivos mediante descuentos al disponer de un precio unitario del viaje muy bajo. Además esta solución comporta ofrecer un mal servicio ya que algunos usuarios podrían estar descontentos al verse obligados a viajar en franjas horarias que no desean.

8. CONCLUSIONES

Para finalizar el trabajo se expondrán a continuación las conclusiones que se han ido extrayendo de los distintos aspectos analizados durante la realización de este estudio, así como las conclusiones finales que responden a los objetivos y razón de ser de este proyecto.

El primer paso del análisis ha consistido en la contextualización del problema. Dada la situación geográfica de Barcelona, las entradas a la ciudad de la demanda proveniente de municipios cercanos se concentra en las brechas naturales de los ríos Llobregat y Besós, así como también lo hace en el corredor artificial Barcelona – Vallès. En este trabajo se ha analizado únicamente la demanda que accede a la ciudad mediante el corredor artificial comparando tres alternativas: carretera de peaje, carretera convencional y ferrocarril; sin embargo, la obtención de datos más concretos requeriría la inclusión de las alternativas mediante las brechas naturales, B-23 y C-58. Sería interesante poder analizar la matriz origen destino de toda la demanda que accede a Barcelona tanto en transporte público como mediante vehículo privado para detectar las carencias y necesidades del transporte público como medio de descongestión de las carreteras.

Una vez contextualizado el problema se ha investigado sobre la modelización del transporte, herramienta que nos permite obtener información acerca de la demanda del corredor y el funcionamiento del mismo. Los procesos de planificación en los que normalmente está incluida la modelización del transporte como ayuda a la toma de decisiones son largos, complejos y requieren de la intervención de equipos multidisciplinares e inversión de recursos. Incluso el propio proceso de modelización completo es muchas veces muy complejo debido a la necesidad de datos concretos, tiempo para su desarrollo y habilidades para su calibración y adaptación a la realidad.

Sin embargo, existen alternativas más simples que permiten obtener unas primeras estimaciones de los resultados. Es esta línea la que se ha seguido en este trabajo, se ha centrado el análisis en la etapa de elección modal mediante el modelo Logit Multinomial que estima la proporción de demanda que escogerá cada una de las diferentes alternativas en función de los Costes Generalizados correspondientes.

Hoy en día, el método más utilizado para la modelización del transporte son los softwares especializados cuyas bases se encuentran en modelos como el escogido en este trabajo. Una vez obtenida una primera aproximación a la realidad como la proporcionada por este trabajo, una buena ampliación del mismo sería el uso de uno de estos softwares.

Para el uso del modelo han sido necesarias investigaciones previas en las se han determinado las hipótesis y se han buscado los datos necesarios. Las congestiones de las diferentes alternativas surgen en la hora punta, de manera que éste ha sido el objeto de estudio. A partir de encuestas, horarios del transporte público y concentración de demanda en los diferentes medios de transporte se ha determinado que la hora punta comprende desde las 7:30 hasta las 9:30 de la mañana, sin embargo puesto que la mayoría de datos se presentan de forma horaria se ha ampliado dicha franja

de 7:00 a 10:00 de la mañana. Además, se ha comprobado que los principales motivos de los desplazamientos realizados en esta franja horaria se realizan por motivos ocupacionales.

Se ha determinado como objeto de estudio la demanda que viaja desde el municipio de Sant Cugat del Vallès hasta Sarrià ya que es un destino común entre las tres alternativas analizadas. Y se ha adoptado la hipótesis de equilibrio de Vickrey en la que se establece que ningún usuario puede mejorar sus Costes Generalizados en caso de decidir cambiar su hora de viaje.

Datos como el valor del tiempo y los costes operacionales han sido cogidos de estándares nacionales, los tiempos de viaje se han calculado para cada modo de transporte, y las tasas se han buscado en las correspondientes operadoras. Estos datos han sido recogidos de manera agregada, una alternativa interesante sería obtener cierto grado de desagregación como por ejemplo aplicar tiempos diferentes para los usuarios de diferentes entradas u estaciones.

El valor del tiempo resulta ser uno de los parámetros más importantes del estudio, el cálculo del mismo para el caso particularizado de la demanda analizada proporcionaría datos más precisos. Así como otras variantes del estudio aportarían más información, como el análisis del corredor en periodos no punta o la introducción de otros destinos.

En cuanto a los resultados obtenidos, con las hipótesis iniciales, el modelo indica que la proporción de demanda que debería utilizar el ferrocarril debería ser muy superior a la de las carreteras debido a sus bajos Costes Generalizados, un 25% inferiores a los de las carreteras. Los costes de las dos carreteras son muy similares, hecho que muchas veces no es percibido por el usuario ya que en el caso de la carretera de peaje desembolsa el coste directamente a través del peaje y en el caso de la carretera convencional soporta el sobrecoste en forma de tiempo o costes de operación del vehículo.

Se comparan los resultados inicialmente obtenidos con los resultados del mismo análisis realizado en condiciones no congestionadas. En este caso las alternativas de las carreteras resultan ser un 30% más baratas que la alternativa mediante ferrocarril, hecho que indica la preferencia por alternativas mediante vehículo privado en caso de que los usuarios no penalicen demasiado las situaciones de congestión.

Comparando los datos proporcionados por el modelo con los datos de las demandas reales y analizando la sensibilidad de las variables, se extraen diversas conclusiones que responden a uno de los objetivos principales del trabajo: **conocer el comportamiento de la demanda**. La demanda de este corredor tiene un valor del tiempo más elevado que la media de la región, el poder adquisitivo elevado de la zona influye en la elección del vehículo privado frente al transporte público, los destinos alejados de Sarrià perjudican notablemente la alternativa ferrocarril, los efectos de la congestión no son penalizados tan negativamente como sería de esperar y el factor comodidad que proporciona el vehículo privado frente al transporte público es una variable altamente importante para la demanda de este corredor.

Otra de las conclusiones que se ha extraído del análisis de datos es que el modelo no tiene en cuenta la capacidad de cada una de las alternativas, por este motivo se decidió estudiar esta característica del corredor de manera separada. Las capacidades de las carreteras viene determinada por la capacidad de absorción que tienen las vías de Barcelona en las que desembocan las carreteras, es evidente que la demanda supera notablemente todas las mañanas esta capacidad. Puesto que la solución para los problemas de congestión surge del traspaso de demanda a la alternativa ferrocarril, se estudia la capacidad del mismo. Se debe añadir que en caso de querer ese trasbase, a parte de mejorar la oferta del ferrocarril se requerirían medidas adicionales como penalizaciones y restricciones al vehículo privado, entre otras.

La línea actualmente permite un ligero crecimiento de la demanda, sin embargo, existen una serie de condicionantes que podrían hacer aumentar la demanda en mayores proporciones. Estos condicionantes son las prolongaciones inauguradas durante los dos últimos años en los extremos de Sabadell y Terrasa, el crecimiento sostenido de la movilidad experimentado en los últimos años en todo el área metropolitana y previsto para los siguientes, y las futuras restricciones y penalizaciones al vehículo privado. Las alternativas de Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya para hacer frente a este incremento de la demanda y ofertar un buen servicio pasan por tres tipos de soluciones.

Las actuaciones en los sistemas de señalización permitirían aumentar la frecuencia de paso, y también lo haría la reordenación de las líneas potenciando los servicios suburbanos creando lanzaderas en las líneas urbanas. Ésta última medida está siendo desarrollada actualmente para ser implementada en 2019, momento en el que las nuevas 15 unidades entrarán en servicio, este incremento del parque de material móvil es necesario para hacer frente a los nuevos itinerarios e incrementos de frecuencia. En última instancia la solución viene dada por la ampliación de la infraestructura mediante el túnel de Horta, infraestructura contemplada en el Plan Director de Infraestructuras desde hace años.

De esta manera queda determinado el otro objetivo principal de este trabajo: **qué soluciones existen para el corredor**. Las pequeñas actuaciones en la línea mejorarán el servicio y permitirán absorber los incrementos de demanda, con el paso del tiempo deberá ejecutarse la ampliación de la infraestructura mediante el túnel de Horta. Debería realizarse el correspondiente análisis para determinar el impacto real, sin embargo, los beneficios se intuye que podrían ser la disminución de la congestión de las carreteras del corredor Barcelona – Vallès y de las otras entradas a Barcelona. Futuras restricciones al vehículo privado en Barcelona o penalizaciones a la hora de circular y aparcar en la ciudad podrían ser futuros motivos que harán necesaria esta infraestructura.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

9.1. Libros, artículos y proyectos

AGENCIA DE ECOLOGÍA URBANA DE BARCELONA; (2007). *Estudio de movilidad y espacio público en Vitoria – Gasteiz*. Ayuntamiento de Vitoria – Gasteiz.

ARQUITECTURA CIUDAD Y ENTORNO; (2012). *SIMCAT: Sistema de modelización de movilidad y tráfico en Catalunya. Integración al modelo EVALUAMET*. Universitat Politècnica de Catalunya.

AUTORITAT DEL TRANSPORT METROPOLITÀ; (2013). *Pla Director d’Infraestructures del transport públic col·lectiu de la regió metropolitana de barcelona 2011-2020*.

BICKEL, P; HUNT, A; DE JON, G; LAIRD, J; LIEB, C; LINDBERG, G; (2006). *Proposal for harmonized guidelines*. Developing harmonized European Approaches for Transport Costing and Project Assessment.

CABILDO DE TENERIFE; (2007). *Plan especial de ordenación del transporte de Tenerife – Memoria de información*.

DEPARTAMENT DE TERRITORI I SOSTENIBILITAT PER A LES AVALUACIONS SOCIOECONÒMIQUES REALITZADES SOBRE LES PRINCIPALS ACTUACIONS VIÀRIES I FERROVIÀRIES IMPULSADES PER LA DIRECCIÓ GENERAL D’INFRAESTRUCTURES DE MOBILITAT TERRESTRE; (2015). *Sistema d’Avaluació d’Inversions en transport*. Generalitat de Catalunya.

DE WITTE, A; HOLLEVOET, J; DOBRUSZKES, F; HUBERT, M; MACHARIS, C; (2013). *Linking modal choice to mobility: a comprehensive review*. Transportation Research Part A: Policy Practice, 49.

EUROPEAN COMMISSION; (2014). *Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects*. Economic appraisal tool for Cohesion Policy 2014 – 2020.

EFE; (2017). *FGC incorporará 15 trenes que doblarán la frecuencia en la línea del Vallès*. La Vanguardia.

GONZÁLEZ SAVIGNAT, M; MATAS I PRAT, A; LLUÍS RAYMOND, J; (2010). *La predicción de la demanda en evaluación de proyectos*. Cuadernos económicos de ICE, (80).

GUTIÉRREZ PUEBLA, J; DANIEL CARDOZO, O; GARCÍA PALOMARES, J. C; (2008). *Modelos de demanda potencial de viajeros en redes de transporte público: aplicaciones en el Metro de Madrid*. IV Seminario de Ordenación Territorial.

GUTIÉRREZ - DOMÈNECH, M; (2008). *¿Cuánto cuesta ir al trabajo? El coste en tiempo y en dinero*. Documentos de economía “la Caixa”.

INSTITUT D'ESTUDIS REGIONALS I METROPOLITANS DE BARCELONA; (2015). *Enquesta de mobilitat en dia feiner*.

INSTITUT D'ESTUDIS REGIONALS I METROPOLITANS DE BARCELONA; (2015). *L'AMB en xifres*. Àrea Metropolitana de Barcelona.

MARTÍNEZ AGUADO, T; MURO RODRÍGUEZ, A; (2011). *Caso de estudio 2: Madrid – Toledo*. Universidad de Castilla – La Mancha.

MIRÓ FARRERONS, J; (2012). *Ordenación urbanística e infraestructuras de los servicios urbanos*. Universitat Politècnica de Catalunya.

ORTÚZAR, J.D; WILLUMSEN, L.G; (2011). *Modelling transport*. John Wiley & Sons.

RACC; (2016). *La congestió en els corredors d'accés a Barcelona*. Fundació RACC.

REDACCIÓN; (2016). *Les congestions de trànsit als accessos a Barcelona podrien augmentar un 50%*. Tot Sant Cugat.

REDACCIÓN; (2017). *Les retencions als accessos a Barcelona augmenten un 26% en un any*. Tot Sant Cugat.

RUS, G; CAMPOS, J; NOMBELA, G; (2003). *Economía del transporte*. Antoni Bosch editor.

SASTRE GONZÁLEZ, J; ÁLVAREZ CASTILLO, D; OLIVA FRANCO, I; NUEVO DELGADO, P; (2016). *Manual en análisis de mercado y explotación en estudios de tráfico y movilidad*. Julián Sastre González.

TARÍN, T; (2016). *El túnel que convirtió Collserola en un paseo cumple 25 años*. La Vanguardia.

VILLALANTE, M; PÉREZ, M; JIMÉNEZ, C; (2014). *Patrones tendencias y estrategias de la movilidad metropolitana*. Quadern del workshop 5, Pla Director Metropolità "Innovació urbana, mobilitat i metabolisme metropolità".

9.2. Webs

AJUNTAMENT DE BARCELONA; (2017). Disponible en: <http://ajuntament.barcelona.cat/es/>

ÀREA METROPOLITANA DE BARCELONA; (2017). Disponible en: <http://www.amb.cat/s/home.html>

CENTRE DE DOCUMENTACIÓ IERMB; (2017). Disponible en: <http://netvibes.com/centre-de-documentacio#Mobilitat>

DIRECCIÓN GENERAL DE TRÁFICO; (2017). Disponible en: <http://www.dgt.es/es/>

FGC; (2017). Disponible en: <http://www.fgc.cat/cat/index.asp>

GOOGLE MAPS; (2017). *Sant Cugat del Vallès*. Disponible en: <https://www.google.es/maps/place/San+Cugat+del+Vallés,+Barcelona/>

TRANSCAD; (2017). *Transportation Planing Software*. Disponible en: <http://www.caliper.com/tcovu.htm>

TÚNELS BARCELONA CADÍ; (2017). Disponible en: <http://www.tunelsbarcelonacadi.cat/es/informacio-empresa>

